



Pro gradu -tutkielma
Fysikaalisten tieteiden koulutusohjelma
Meteorologia

Pohjois-Atlantin subpolaaripyörteen äkillisen heikkenemisen todennäköisyys ja vaikutukset Euroopan ilmastoon tällä vuosisadalla.

Pekka Pouta
Päivämäärä
30.5.2020

Ohjaaja: Jouni Räisänen
Tarkastajat: Heikki Järvinen ja Jouni Räisänen

HELSINGIN YLIOPISTO
MATEMAATTIS-LUONNONTIETEELLINEN TIEDEKUNTA
PL 64 (Gustaf Hällströmin katu 2a)
00014 Helsingin yliopisto

| | | | |
|--|--|--|---|
| Tiedekunta – Fakultet – Faculty Matemaattis-luonnontieteellinen | | Koulutusohjelma – Utbildningsprogram – Degree programme Fysikaalisten tieteiden koulutusohjelma Meteorologia | |
| Tekijä – Författare – Author Pekka Pouta | | | |
| Työn nimi – Arbetets titel – Title Pohjois-Atlantin subpolaaripyörteen äkillisen heikkenemisen todennäköisyys ja vaikutukset Euroopan ilmastoon tällä vuosisadalla. | | | |
| Työn laji – Arbetets art – Level Pro gradu | | Aika – Datum – Month and year 30.5.2020 | Sivumäärä – Sidantal – Number of pages 53 |
| Tiivistelmä – Referat – Abstract <p>Hallitustenvälinen ilmastomuutospaneeli IPCC määrittelee Pohjois-Atlantin subpolaaripyörteen ilmaston käänne-elementiksi, joka voi joutua ilmaston muutoksen seurauksena toiseen tilaan. Tässä työssä tarkastellaan ensin tieteellisten artikkelien pohjalta subpolaaripyörrettä ja sen vuorovaikutusta muun meren, sekä ilmakehän kiertoliikkeen kanssa. Sen jälkeen muodostetaan CMIP5-projektin (Coupled Model Intercomparison Project 5) ilmastomallien pohjalta kaksi malliryhmää. Toisessa on kolme mallia, joissa subpolaaripyörteen syvänveden muodostus romahtaa, toinen on vertailuryhmä.</p> <p>Subpolaaripyörteen romahdus näyttää todennäköisemmältä kuin CMIP5-malliryhmien kokoa vertailemalla voisi päätellä ja romahdus voi tapahtua jo pienimmällä RCP2.6-skenaariolla. Suunnilleen yhtä todennäköistä, kuin yksi romahdus, on useampi nopea subpolaaripyörteen heikkeneminen, joiden välissä subpolaaripyörre voimistuu uudelleen. Tämä ilmiö voi lisätä tulevaisuuden ilmastossa vaikeasti ennakoitavaa vuosikymmenten välistä vaihtelua.</p> <p>Subpolaaripyörteen romahduksen ilmastovaikutukset ovat suurimmat arktisella alueella, Pohjois-Atlantilla ja Euroopassa. Se heikentäisi pohjoisen napa-alueen lämpenemistä, joka muuten on paljon voimakkaampaa kuin maapallon keskimääräinen lämpeneminen. Euroopassa ilmiö hillitsee ilmastomuutoksen aiheuttamaa lämpenemistä ja voi muuttaa ilmakehän keskimääräistä kiertoliikettä. Suurimmat vaikutukset keskittyvät kuitenkin subpolaaripyörteen alueelle.</p> | | | |
| Avainsanat – Nyckelord – Keywords Pohjois-Atlantin subpolaaripyörre, ilmastomuutos, CMIP5, AMOC, NAO | | | |
| Säilytyspaikka – Förvaringsställe – Where deposited Kumpulan tiedekirjasto | | | |
| Muita tietoja – Övriga uppgifter – Additional information | | | |

Sisällysluettelo

| | |
|--|-----------|
| Lyhenneluettelo..... | iv |
| 1. Johdanto | 1 |
| 2. Subpolaaripyörre..... | 4 |
| 2.1. Havainnot..... | 4 |
| 2.2. Rakenne | 6 |
| 2.3. Dynamiikka..... | 8 |
| 3. Subpolaaripyörteen vuorovaikutus merten ja ilmakehän muun kiertoliikkeen kanssa..... | 12 |
| 3.1. NAO ja SPG..... | 12 |
| 3.2. AMOC | 16 |
| 4. Pohjois-Atlantin kiertoliike viime vuosikymmeninä..... | 20 |
| 4.1. 1970-luvun kylmä anomalia | 20 |
| 4.2. 1970-luvun jälkeinen kehitys subpolaaripyörteessä ja AMOCissa | 22 |
| 5. Koeasetelma | 26 |
| 5.1. Käytettävissä olevat mallit ja skenaariot..... | 26 |
| 5.2. SPG-romahdusta kuvaavien mallien valinta | 30 |
| 5.3. Subpolaaripyörteen romahduksen todennäköisyys..... | 34 |
| 6. Äkillisen kylmenemisen eteneminen SPG-romahdus-malleissa. | 37 |
| 7. Subpolaaripyörteen muutosten vaikutus ilmastoon tulevaisuudessa..... | 39 |
| 7.1. Pääpiirteet | 39 |
| 7.2. Tulokset | 41 |
| 8. Yhteenveto..... | 48 |
| Lähdeluettelo | 50 |

Lyhenneluettelo

AMOC Atlantic Meridional Overturning Circulation. Atlantin meridionaalinen kiertoliike, jossa pinnalla kulkee lämmintä vettä pohjoiseen ja kylmää vettä etelään

AMO Atlantic Multidecadal Oscillation. Atlantin monen vuosikymmenen mittainen oskillaatio meren lämpötiloissa.

AMV Atlantic Multidecadal Variability. Kuten AMO, mutta ei ota kantaa meren lämpötilan vaihtelun säännöllisyyteen

CMIP5 IPCC:n Coupled Model Intercomparison Project 5 ilmastomallivertailu

NAO North Atlantic Oscillation. Pohjois-Atlantin värähtely. Positiivinen NAO kuvaa voimakasta matalapainetoimintaa ja myrskyrataa Pohjois-Atlantilla

OSNAP Meren havaintojärjestelmä, joka ulottuu Kanadasta Grönlannin eteläkärkeen ja sieltä Skotlantiin

RAPID-MOCHA Meren havaintojärjestelmä leveyspiirillä 26°N. Ulottuu Atlantin halki ja käytetään etenkin AMOCin havainnointiin

SPG Subpolar Gyre. Subpolaaripyörre Pohjois-Atlantilla, jossa syntyy merkittävä määrä Atlantin syvää vettä

SROC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate) (IPCC, 2019)

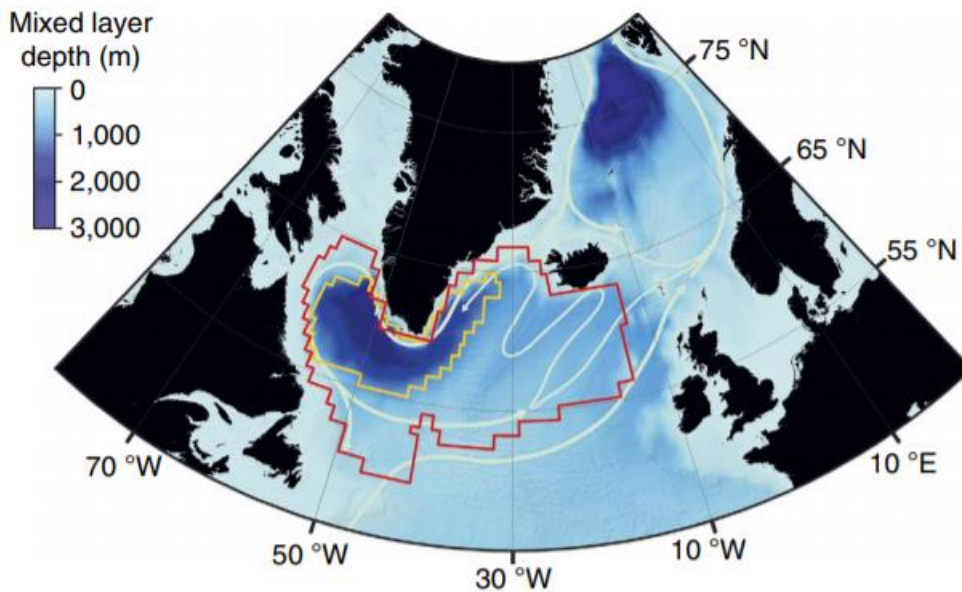
Merivirtojen lyhenteen ovat erikseen kappaleessa 2.2

1. Johdanto

Eurooppa ja etenkin Pohjoismaat ovat pohjoiseen sijaintiinsa nähden selvästi lämpimämpiä Pohjois-Atlantin lämmittävän vaikutuksen ansiosta. Suomi on suunnilleen yhtä pohjoisessa kuin ilmastoltaan selvästi kylmempi Alaska. Tämä on myös ainut seutu, jossa voidaan viljellä maata näin pohjoisessa. Muut näin pohjoiset alueen ovat pääosin ikeiroudassa. Suurin osa lämmittävistä vaikutuksista on seurausta keskimääräisestä lounaisvirtauksesta, joka tuo merellistä kosteaa ilmaa talvisin lounaasta Pohjois-Eurooppaan ja jopa Arktisille alueille asti (Seager ym. 2002). Tuota lämmittävää lounaisvirtausta pitävät yllä vuoristot ja etenkin Pohjois-Amerikan Kalliovuoret. Sama vuoristojen vaikutus näkyy myös meren kiertoliikkeessä, jopa siinä määrin, että ilman vuoristoja tehdyssä mallisimulaatiossa Pohjois-Atlantin termohaliininen kiertoliike loppuu (Sinha ym. 2012).

Termohaliininen kiertoliike tarkoittaa meriveden lämpötila- ja suolaisuuserojen aiheuttamien tiheyserojen aikaansaamaa kiertoliikettä. Termi Atlantin meridionaalinen kiertoliike (Atlantic Meridional Overturning Circulation eli AMOC) taas kuvaa Atlantin pohjois-etelä- ja pystysuuntaista kiertoliikettä, jossa vettä virtaa nettomääräisesti pinnan lähellä pohjoiseen ja syvemmällä etelään. Vaikka termohaliiniseen kiertoliikkeeseen kuuluu muitakin kuin AMOC, käytetään näitä termejä tässä työssä synonyymeinä toisilleen. Suurin osa AMOCin syvästä kylmästä pohjavedestä syntyy kuvassa 1 näkyvässä subpolaaripyörteessä (SPG subpolar gyre) Grönlannin eteläpuolella.

Viimeisinä vuosikymmeninä on noussut esille huoli, että syvänveden muodostus SPG:ssä voi romahtaa nopeasti ilmaston muuttuessa, heikentää AMOCia ja vaikuttaa myös keskimääräiseen ilmakehän virtaukseen. Tällä voisi olla laajat vaikutukset etenkin Euroopan ilmastoon. Ilmastosimulaatioista on löydetty termohaliinisen kiertoliikkeen vaihtoehtoisia tiloja, joissa syvää vettä ei muodostu subpolaaripyörteessä vaan muualla. Tämä voisi tapahtua esimerkiksi Pohjois-Atlantin pintaveden suolapitoisuuden laskiessa (Jackson ym. 2017). Hallitustenvälisen ilmastonmuutospaneelin eli IPCC:n SROC-raportti (Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate) (IPCC, 2019) pitää sekä termohaliinista kiertoliikettä että subpolaaripyörrettä ilmaston käänne-elementteinä. Ne voivat joutua ilmaston muuttuessa toiseen tilaan, josta palaaminen ei tapahdu lineaarisesti.



Kuva 1 Syvän veden muodostusalueet Pohjois-Atlantilla (Sgubin ym. 2017). Väritys kertoo talven keskimääräisen maksimisekoitusyvyyden (m) 1993–2012. Punaisen käyrän rajaamaa aluetta Sgubin ym. käyttivät verratessaan SPG:n lämpötilan muutoksia muuhun merialueeseen. Keltaisen käyrän rajaamaa aluetta, jossa sekoitusyvyyys on yli 1000 m he käyttivät analysoidessaan mallien kykyä kuvata syvänveden muodostusta. Nuolet kertovat pääasialliset meren pintavirtaukset. Tässäkin työssä SPG:llä tarkoitetaan punaisen käyrän rajaamaa aluetta (ellei toisin erikseen mainita).

Termohaliininen kiertoliike on heikkenemässä ilmaston muuttuessa (Menary ja Wood 2017), mutta sen sammumista kokonaan tämän vuosisadan kuluessa pidetään IPCC:n raportissa erittäin epätodennäköisenä. Subpolaaripyörteen siirtyminen toiseen tilaan ei aiheuttaisi niin suurta kylmenemistä kuin koko AMOCin romahtaminen. Pyörteen heikkeneminen voisi tapahtua noin vuosikymmenessä, eli selvästi AMOCin heikkenemistä nopeammin. IPCC:n ilmastomalleissa 17.5 prosentissa (7/40) esiintyy SPG-alueen viileneminen. Epävarmuutta arvioon tuo mallien huono kyky kuvata nykyistä syvän veden muodostumista SPG:n alueella (Sgubin ym. 2017).

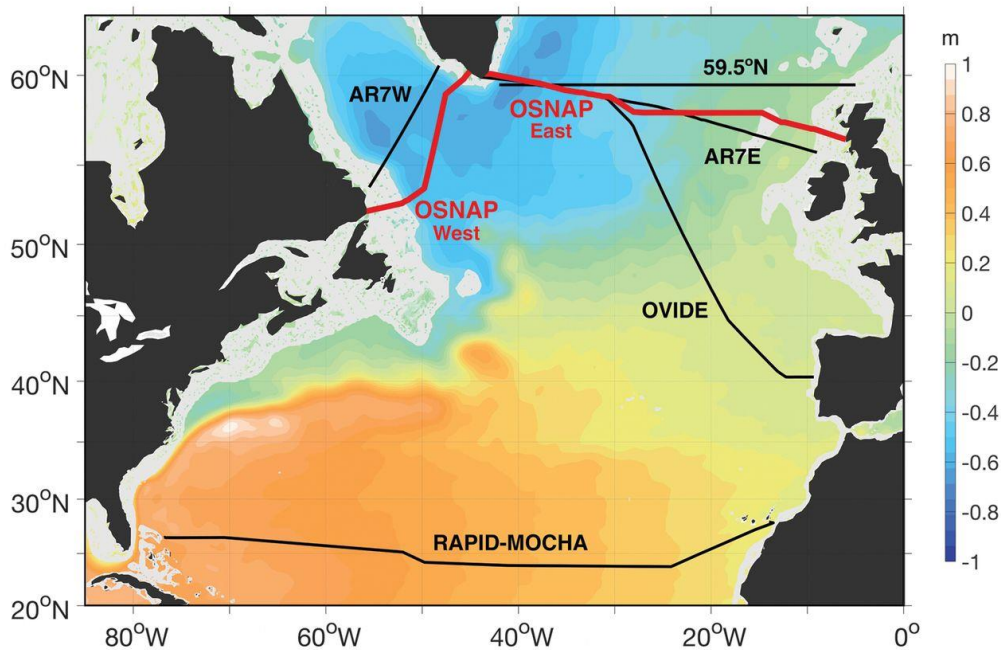
Tässä pro gradu -tutkielmassa tarkastellaan subpolaaripyörteen sammumisen mahdollisuutta tällä vuosisadalla ja tämän SPG:n romahtaminen vaikutuksia muuhun meren ja ilmakehän kiertoliikkeeseen sekä Euroopan ilmastoon. Toisessa luvussa käydään läpi mitä tiedämme SPG:stä. Kolmas luku keskittyy SPG:n vuorovaikutukseen muun kiertoliikkeen kanssa. Neljännessä luvussa tarkastellaan SPG:n kehitystä viimeisten vuosikymmenien aikana. Luvussa viisi arvioidaan IPCC:n CMIP5-projektin (Coupled Model Intercomparison Project 5) arkistossa olevien noin 40 mallin

kykyä kuvata SPG:n äkillistä heikkenemistä ja valitaan koeasetelma kuvaamaan SPG:n romahduksen vaikutusta ilmastoon. Luvussa kuusi kuvataan mahdollinen tapahtumien kulku, jos syvän veden muodostus SPGssä loppuu. Luvussa seitsemän verrataan ilmaston muutosta malleissa, joissa SPG romahtaa malleihin, joissa ei tapahdu SPG:n äkillistä heikkenemistä. Lopuksi esitän tiivistelmän siitä, mihin johtopäätöksiin olen tullut ja mitkä asiat vaikuttavat epävarmimmilta.

2. Subpolaaripyörre

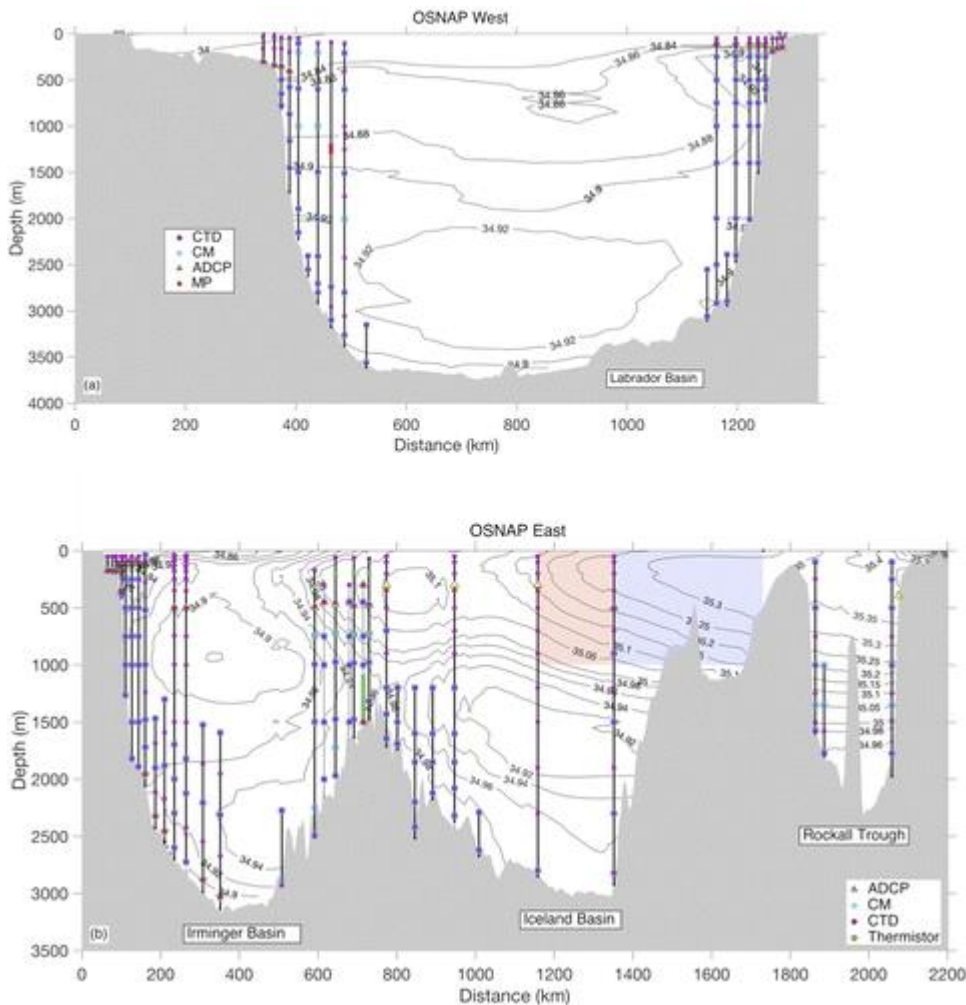
2.1. Havainnot

Merien havaintojärjestelmä on kehittynyt paljon viime vuosikymmenien aikana. RAPID-MOCHA on toiminut vuodesta 2004 leveyspiirillä 26°N. OSNAP- havaintojärjestelmä (<https://www.osnap.org/>) subpolaaripyörteen alueella valmistui vuonna 2014. Molemmissa havaintojärjestelmissä on pohjaan ankkuroituja mittalaitteita, joista saadaan lämpötila, massa ja suolaisuus (kuva 2). Kuvassa 3 näkyy esimerkkinä OSNAP-järjestelmästä saatavaa tietoa (Lozier ym. 2017).



Kuva 2 (Lozier ym. 2019) Pohjois-Atlantin pysyvät meren havaintojärjestelmät. Punaisella viivalla on merkitty OSNAP-havaintojärjestelmä. OSNAP täydentää kuvassa näkyviä muita havaintojärjestelmiä. Kartan väritys on merenpinnan keskimääräinen dynaaminen korkeus metreinä. 500m matalammat alueet ovat harmaita.

ARGO-poijut ovat tulleet laajempaan käyttöön vasta tällä vuosituhatluvalla. Tällä hetkellä noin 3200 poijuja tekee 100 000 lämpötila-, suolaisuus- ja virtausmittausta vuodessa. Poijut laskeutuvat kerran 10 päivässä 2000 m syvyyteen ja tekevät samalla luotauksen. Poijuja on keskimäärin 3 asteen (n. 300 km) välein ja esimerkiksi SPG-alueella vielä tiheämmin (<http://www.argo.ucsd.edu/>).



Kuva 3 (Lozier 2017) Pohjaan ankkuroidut mittalaitteet (a) OSNAP West (b) OSNAP East. Termistori (Thermistor) on lämpötilaa mittaava vastus. CTD (Conductivity, Temperature, Depth) mittaa lämpötilan, paineen kautta syvyyden ja sähkönjohtavuuden kautta suolaisuuden. CM (current meter) on virtausmittari. ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler) on eräänlainen vedenalainen SONAR, jolla saadaan mitattua virtaus. MP (moored profiler) on pohjaan ankkuroitu poiju, jolla saadaan pystyluotaus. Värjätyllä alueella tehdään havaintoja liukureiden avulla: punainen on Kiinan, sininen Ison-Britannian. Harmaat pystyviivat alemmassa kuvassa Irmingerin altaan itälaidalla ovat ranskalaisten ankkuroituja mittareita. Harmaat käyrät kuvaavat keskimääräistä suolaisuutta 2005 -2012.

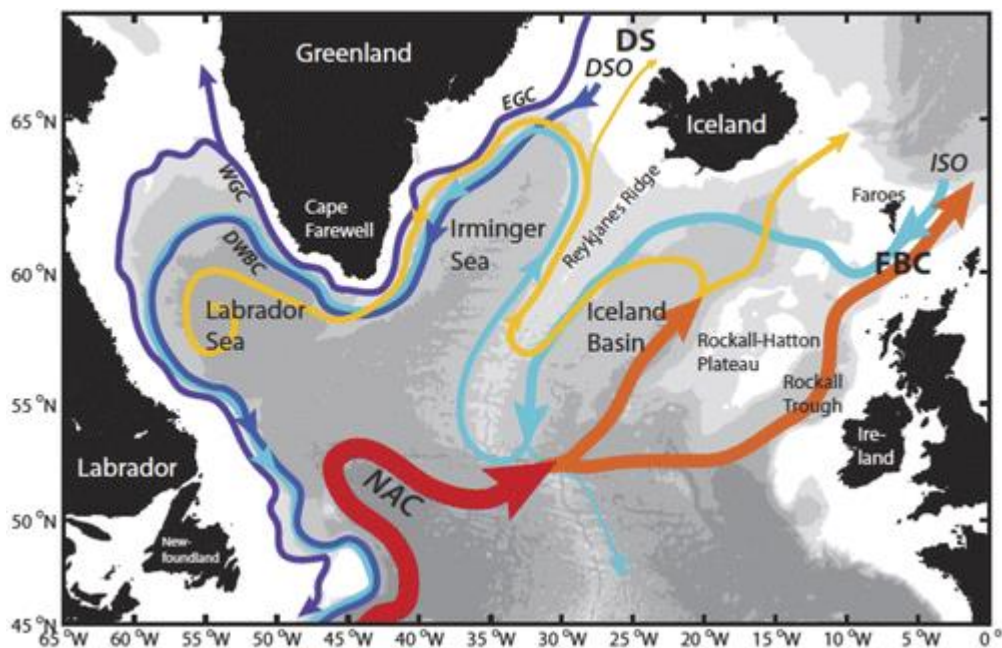
Pohjois-Atlantin ja Jäämeren yhdistäviltä alueilta ei ole jatkuvaa havaintosarjaa. Kanadan saariston salmista, Kanadan ja Grönlannin välistä, Framin salmesta ja Huippuvuorten ja Norjan väliltä puuttuvat siis havainnot virtauksen monivuotisesta luontaisesta vaihtelusta.

Atlantin pintalämpötilassa on suurta luontaista vaihtelua monen kymmenen vuoden aikaskaalassa ja tämä vaihtelu vaikuttaa merkittävästi maapallon ilmastoon (Sutton ja Hodson 2007). Suorat havainnot subpolaaripyörteen alueelta eivät kata edes yhtä tällaista jaksoa. Satelliittiajalta meren pintalämpötilahavainnot ulottuvat 1980-luvun alkuun. Ajalta ennen sitä on vain kauppalaivojen havaintoja. Tämän takia turvaudutaan välillisiin havaintoihin kuten meren pinnankorkeuden vaihteluihin, merenpohjan kerrostumista saataviin aikasarjoihin ja Grönlannin jääkairauksiin. Näiden välillisten havaintojen, ilmasto- ja merimallien avulla luodaan sitten kuvaa Pohjois-Atlantin historiallisesta vaihtelusta.

Havaintosarjojen lyhyttä ja harvuutta on koitettu korjata uusanalyysimallinnuksilla. Meren syvempien havaintojen tuominen mukaan uusanalyysituotteisiin ei ole ongelmatonta. Havaintojen mukaan ottaminen sai tuotteet kyllä vastaamaan paremmin RAPID-havaintoja ja voimisti useamman vuosikymmenen trendejä AMOCissa. Pinnan alta tehtyjen havaintojen mukaan ottaminen johtaa kuitenkin huomattavaan vuosittaiseen vaihteluun eri uusanalyysituotteiden välillä, eikä tämä vaihtelu johdu pakotteiden tai mallien vaihtelusta (Karspeck ym. 2015). Tuloksena saatiin jopa vastakkaisia trendejä AMOCille vuosikymmenen mittakaavassa. Uusanalyysituotteet voivat olla herkkiä tavalle, jolla uudet syvemmät havainnot otetaan mukaan. Toinen mahdollinen selitys on meren syvempien havaintojen harvuus.

2.2. Rakenne

Perinteinen käsitys SPG:n rakenteesta ja merivirroista näkyy kuvassa 4. Syvin vesi alueelle tulee Tanskan salmesta ylivuotona (DSO Denmark Strait Overflow). Tähän sekoittuu vettä ISO:sta (Island Scotland Overflow, Islannin-Skotlannin ylivirtaus) ja EGC:stä (East Greenland Current, Itä-Grönlannin virta). Tämän Grönlannin ja Skotlannin itäpuolelta tulleen vesimassan päälle muodostuu konvektiossa kevyempää syvää vettä LSW (Labrador Sea Water, Labradorinmeren vesi). Tämä useammasta komponentista muodostunut syvä vesi poistuu alueelta läntisessä reunavirtauksessa (WBC, Western Boundary Current). WBC muodostaa AMOCin syvemmän kylmän osan ja suunnilleen sama määrä vettä tulee takaisin lähempänä pintaa lämpimässä Pohjois-Atlantin virrassa (NAC, North Atlantic Current). Viime aikoina on tutkittu sitä, kuinka suuri osa WBC:n vedestä jää kiertämään Pohjois-Atlantille eikä osallistu AMOCiin (Zou ja Lozier 2016).



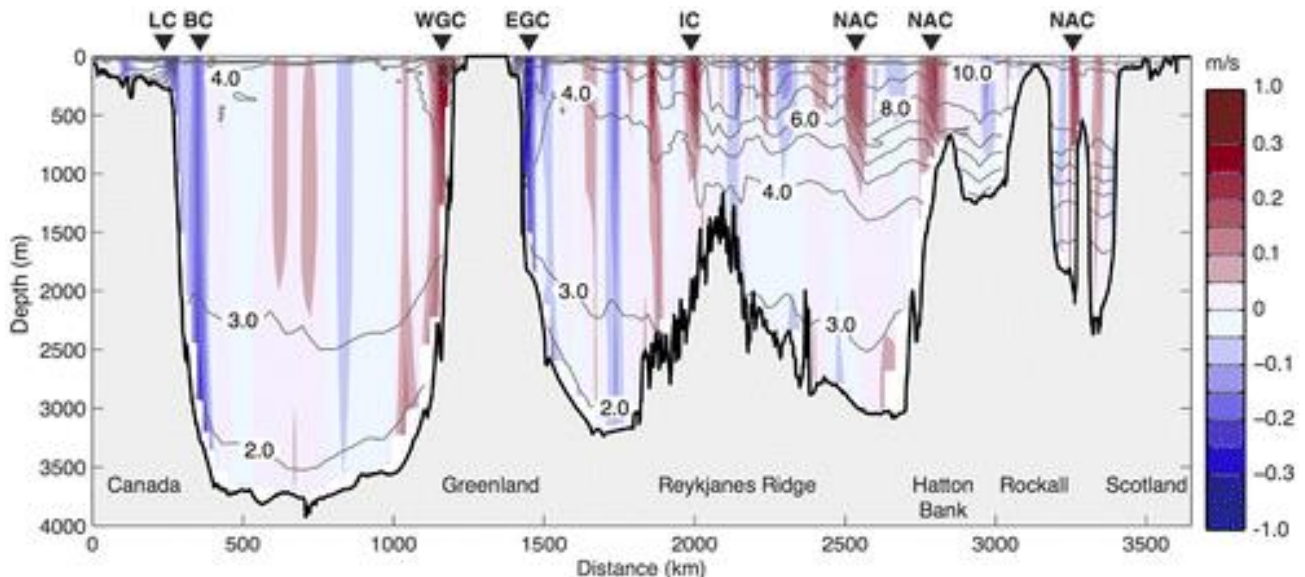
Kuva 4 Tärkeimmät merivirrat SPG-alueella (Lozier, ym. 2017) Lyhenteet taulukossa 1

| Lyhenne | Selitys |
|---------|---|
| DS | Denmark Strait Tanskansalmi |
| DSO | Denmark Strait Overflow Tanskansalmen ylivuoto |
| DWBC | Deep Western Boundary Current Syvä läntinen reunavirtaus. |
| EGC | East Greenland Current Itä-Grönlannin virta |
| FBC | Faroe Bank Channel Faroen matalikon kanava |
| ISO | Iceland Scotland Overflow Islannin ja Skotlannin välinen ylivuoto |
| NAC | North Atlantic Current Pohjois-Atlantin virta |
| WGC | West Greenland Current Länsi-Grönlannin virta |
| LC | Labrador Current Labradorin virta |
| IC | Iceland Current Islannin virta |

Taulukko 1 Merivirtojen ja salmien lyhenteitä

Subpolaaripyörteen syvänveden muodostumisen merkki on sekoittuneen kerroksen syvyys. Syvää vettä syntyy talvella, kun pintavesi muuttuu raskaammaksi jäähtyessään. Talvella 2001 Grönlanninmerellä havaittiin syvänveden muodostusta läpimitaltaan vain 10 km putkessa, joka ulottui 2400 m syvyyteen (Wadhams ym. 2002). Tämä tapahtui aikana, jolloin alueen syvänveden muodostuksen ajateltiin lakanneen ja edellinen pohjaan asti ulottunut konvektio oli havaittu 1984. Näin pienen mittakaavan rakenteiden esiintyminen vaikeuttaa huomattavasti niiden havainnointia. Veden sekoittumista tapahtuu suurelta osin isommissa, noin 100 km pyörteissä (Jones ja

Abernathy 2019). Alueen merivirrat ovat myös selvästi pienempää mittakaavaa kuin IPCC:n ilmastomallien erotuskyky (kuva 5). Näiden resoluutio-ongelmien vuoksi suuri osa meren fysiikasta joudutaan parametrisoimaan ilmastomuutosta kuvaavissa malleissa.



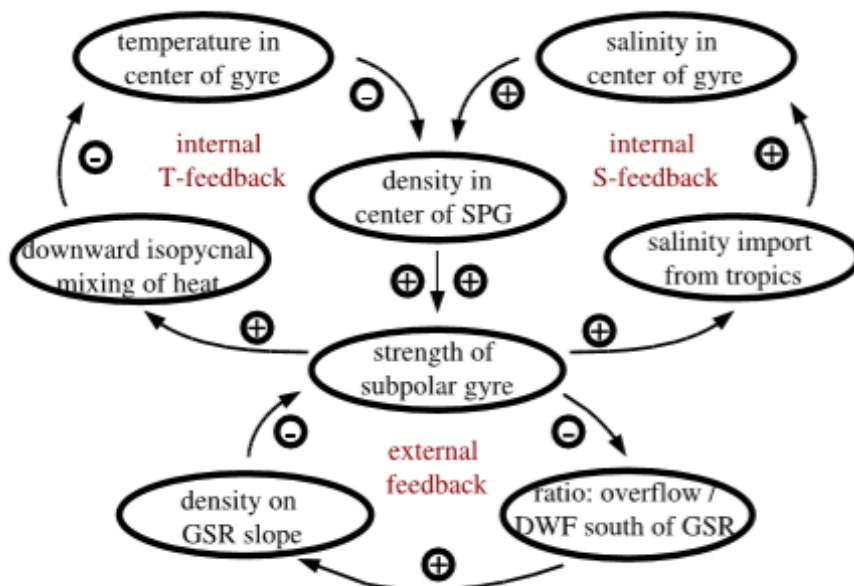
Kuva 5 (Lozier 2017) OSNAP-havaintojärjestelmän antamaa tietoa kesä-heinäkuussa 2014; linjan poikki suuntautuva nopeus värityksellä (positiivinen on kohti pohjoisnapaa, $m\ s^{-1}$) ja potentiaalilämpötila ($^{\circ}C$) käyrillä. Tärkeimmät merivirrat merkitty: LC, Labrador current Boundary Current (BC), WGC, EGC, IC, and NAC.

2.3. Dynamiikka

Subpolaaripyörteessä syntyy syvää vettä etenkin kevättalvella, kun arktista kylmää ilmaa pääsee purkautumaan luoteesta alueelle. Silloin pintavesi luovuttaa paljon lämpöä ilmakehään, jäähtyy ja sekoittuu syvempään veteen. Tuo syvänveden muodostus on pitkälti tuulikentästä riippuvaa ja vaihtelee paljon vuosittain. NAO:n (North Atlantic Oscillation, Pohjois-Atlantin värähtely) positiivisen vaiheen vallitessa SPG:n alueella on keskimääräistä voimakkaampi matalapainetoiminta, joka imee luoteesta alueelle erittäin kylmää ilmaa. Meriveden pintakerros jäähtyy voimakkaasti, syntyy konvektiota ja kylmä vesi sekoittuu syvempään kerrokseen. Koska jäähtynyt vesi pyörteessä on ympäröivää vettä raskaampaa, pyörre voimistuu. Pyörrettä heikentävä takaisinkytkentä toimii karkeasti ottaen seuraavalla tavalla. Konvektio heikkenee, kun SPG:n alueelle ei virtaakaan talvella kylmää ilmaa. Subpolaaripyörteen kerrostuneisuus muuttuu stabiilimmaksi, ja koko SPG:n tiheys pienenee. Tämä heikentää pyörrettä ja alueelle ei tule

raskaasta suolaista vettä niin paljon, vaan suurempi osa siitä virtaa Norjanmerelle tai kääntyy takaisin subtrooppiseen pyörteeseen. Pienentynyt suolaisuus alueella tekee pintavedestä kevyempää ja pyörre heikkenee edelleen.

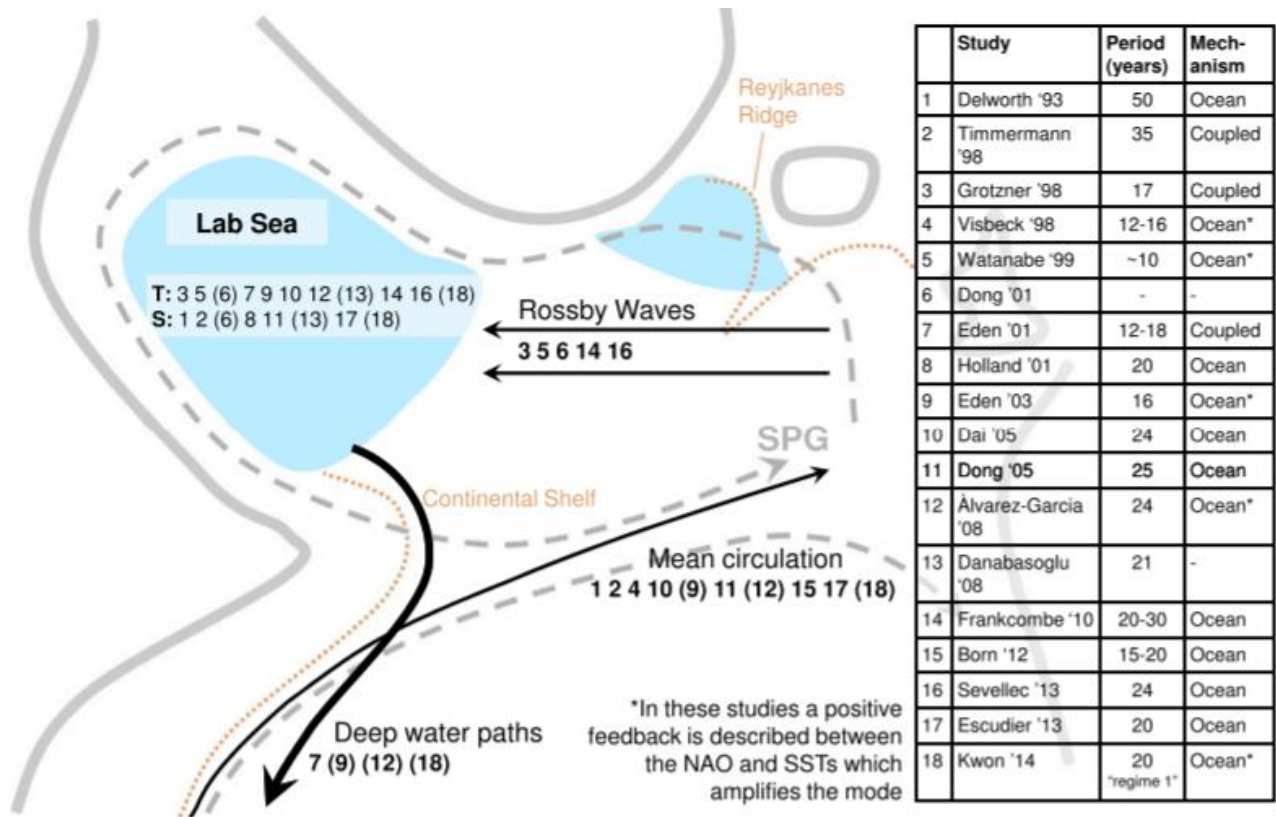
SPG:n voimakkuudessa on pitkäkestoista vaihtelua ja kymmenet eri tutkimukset ovat selvittäneet vaihtelun mekanismeja ja aikaskaaloja. Osassa ilmasto- ja merimalleja SPG:llä on kaksi toisistaan poikkeavaa tilaa, joiden välillä se vaihtelee epälineaarisesti (Born ym. 2013). Kuvassa 6 on yksinkertainen meren takaisinkytkentäkaavio yhdestä karkearesoluutioisesta ilmastomallista (Levermann ja Born 2007). Suolaisuustakaisinkytkennässä voimakas subpolaaripyörre tuo lisää suolaista raskasta vettä pyörteen alueelle ja vähemmän Norjanmerelle. Tämä nostaa tiheyttä pyörteen alueella ja voimistaa pyörrettä. Lämpötilatakaisinkytkennässä pyörteen voimistuminen johtaa voimakkaampaan sekoittumiseen. Se jäähdyttää pyörrettä syvemmältä ja tekee siitä tiheämmän. Tämä voimistaa barokliinista kiertoliikettä pyörteen ympärillä ja kykentä on valmis. Ulkoisessa takaisinkytkennässä voimakkaampi SPG pienentää Norjanmerelle menevää vesimäärää. Suurempi osa alueelle virtaavasta vedestä vajoaa ennen Grönlannin ja Skotlannin välistä selännettä (GSR; Greenland-Scotland Ridge). Tämä vähentää tiheän syvän veden takaisinvirtauksen määrää GSR:n yli. Tämän seurauksena pyörteen pohjoisreuna muuttuu kevyemmäksi, tiheysgradientti pyörteen laitojen välillä kasvaa ja pyörre voimistuu. Nämä takaisinkytkennät johtavat kyseisessä mallissa kahteen mahdolliseen tilaan.



Kuva 6 Subpolaaripyörteen (SPG) positiivinen takaisinkytkentä (Levermann ja Born 2007)

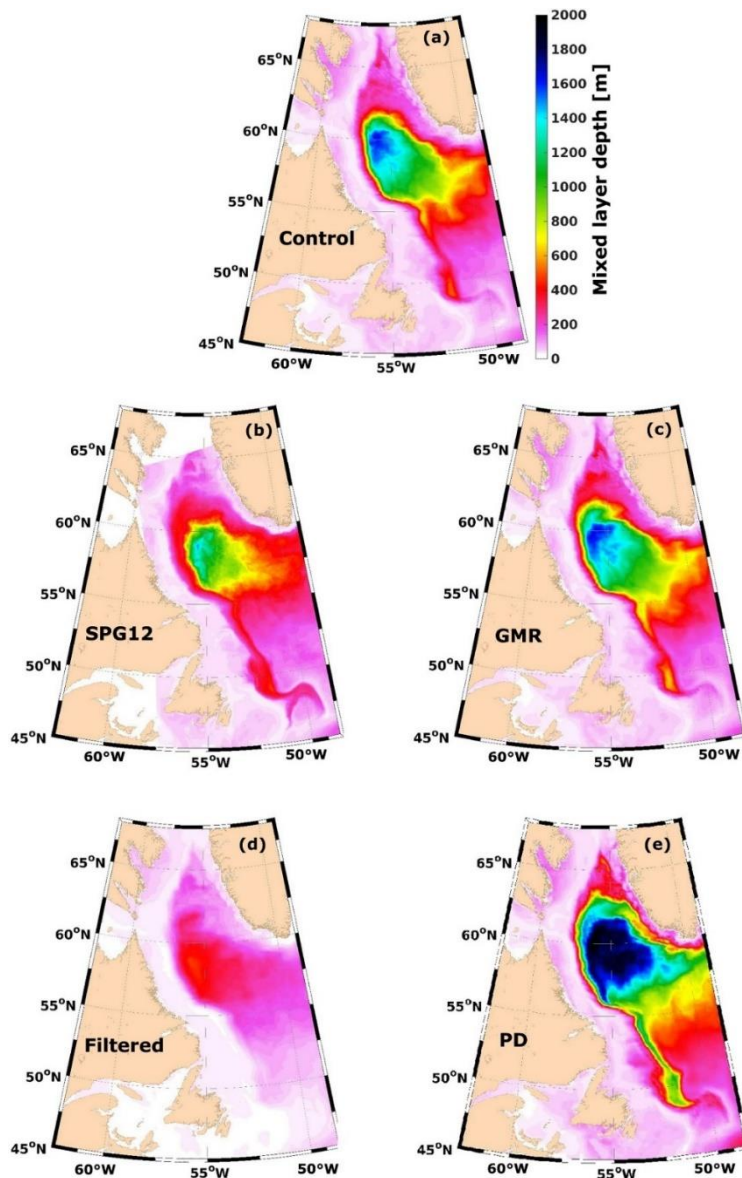
Todellisuudessa tilanne on paljon monimutkaisempi. Edellisessä ei puututtu meren ja ilmakehän vuorovaikutukseen. Eri meri- ja ilmastomalleilla on erilaisia takaisinkytkentöjä ja niiden

vaikutusajat vaihtelevat suuresti mallista toiseen. Menary ym. (2015) summasivat 18 eri mallinnuksen tuloksia yhteen kuvaan (kuva 7). Kuten Menaryn ym. artikkelissa sanotaan: kyseessä on äärimmäinen yksinkertaistus kyseisistä tutkimuksista. Siitä saa kuitenkin hyvän kuvan SPG-vuorovaikutusten monimutkaisuudesta ja hajonnasta eri mallitutkimuksien välillä.



Kuva 7 (Menary ym. 2015) Osa kirjallisuudessa esitetyistä mallinnuksista, joissa esiintyy sisäistä jaksollista vaihtelua SPGn alueella. Oikealla olevassa taulukossa on luettelo tutkimuksista ja niihin liittyvät kuvassa käytetyt numerot. Taulukon kolmannessa sarakkeessa näkyy, kuinka pitkäkestoista tutkimuksissa havaittu suurin vaihtelu on, ja neljännessä sarakkeessa onko vaihtelu pääosin merestä vai meren ja ilmakehän vuorovaikutuksesta johtuvaa. Tähdellä merkityissä tutkimuksissa ilmakehä voimistaa, muttei muuten muuta vaihtelua. Tutkimuksien takaisinkytkennät on jaoteltu neljään luokkaan: 1) syvän veden vuorovaikutukset läntisessä reunavirtauksessa (WBC), 2) Rossby-aallot tai geostrofisen advektio SPG:n poikki, 3) tropiikista tulevien poikkeamien advektio SPG-alueelle ja 4) pienten poikkeamien kasaantuminen vähitellen SPG:hen Labradorinmerellä. Viimeisessä kohdassa tutkimukset on jaettu vielä niihin, joissa lämpötila (T) ja suolaisuus (S) määrää muutokset vuosikymmenien aikaskaalassa. Suluissa olevat tutkimusten numerot liittyvät useampaan kuin yhteen määräävään takaisinkytkentätyyppiin.

Garcia-Quintana ym. (2019) tutkivat mallin resoluution, makean veden lisäyksen, ilmakehän alle 10 päivän vaihteluiden ja sademäärän vaikutuksia Labradorinmeren veden (LSW) muodostukseen. Mallikokeissa havaittiin, että selvästi suurin vaikutus oli ilmakehän alle kymmenen päivän vaihtelulla (kuva 8). Kun matalapainetoiminta alueella, eli alle 10 päivän vaihtelu poistettiin, pieneni lämmön luovutus ilmakehään 44% ja syvänveden muodostus 89%. Seuraavassa kappaleessa syvennytään SPG:n vuorovaikutukseen ympäristön ja muun kiertoliikkeen kanssa.



Kuva 8 Garcia-Quintana ym. (2019) Maaliskuun sekoitussyvyys Labradorin merellä 2004-2016 eri mallisimulaatioissa (a) Kontrolli, (b) SPG12:ssa resoluutio Labradorin merellä nostettu $1/4^\circ$:sta $1/12^\circ$:een, (c) GMR, Grönlannin sulamisvesi poistettu, (d) Filtered, ilmakehän alle 10 päivän vaihtelu poistettu (e) PD, sademäärää pienennetty.

3. Subpolaaripyörteen vuorovaikutus merten ja ilmakehän muun kiertoliikkeen kanssa

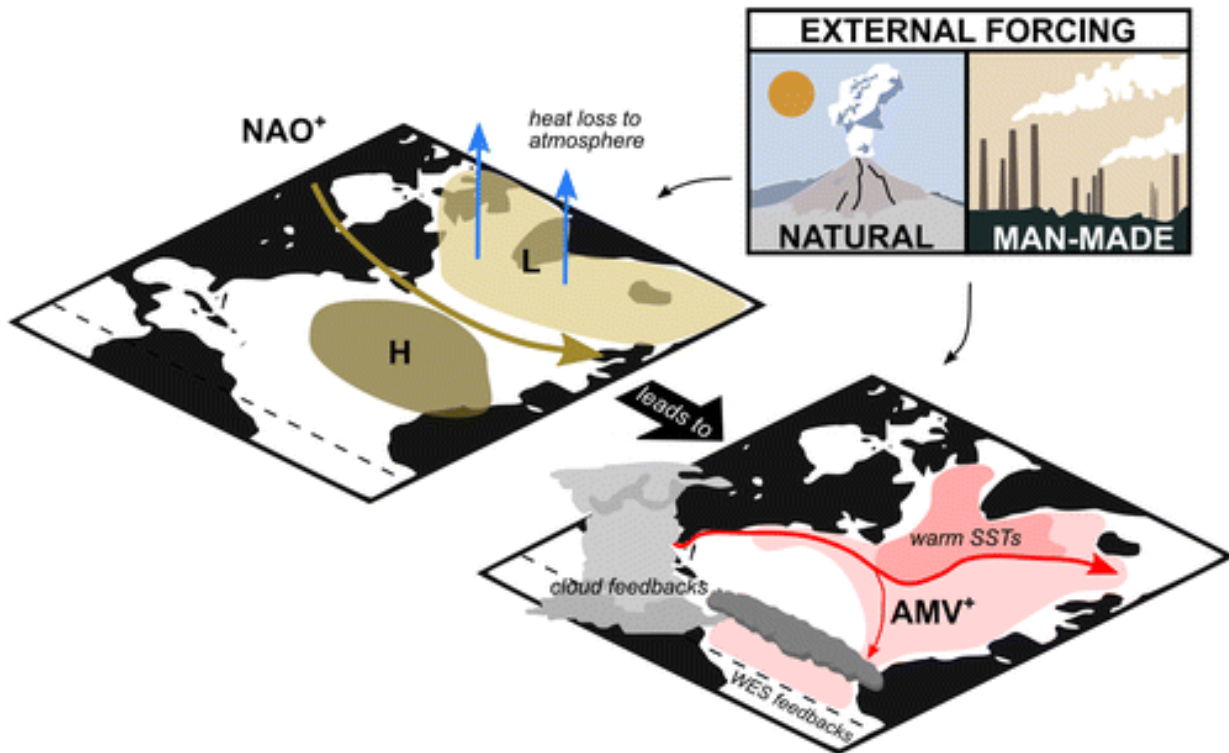
Subpolaaripyörre on olennainen osa koko maapallon laajuista termohaliinista kiertoliikettä. Maapallon laajuisessa termohaliinisessa kiertoliikkeessä liikkeelle panevana voimana on tuulen aiheuttama syvän veden nousu eteläisen pallonpuoliskon länsituulten vyöhykkeellä (Jackson ym. 2017). Jos syvän veden muodostuminen estyy subpolaaripyörteessä, se korvautuu jossain muualla. Ääritapauksessa jos Pohjois-Atlantin termohaliininen kiertoliike romahtaisi täysin, syvänveden muodostus voisi tapahtua Tyynen valtameren pohjoisosassa tai Etelämanteren vieressä sijaitsevilla syvänveden muodostus alueilla. Pelkän subpolaaripyörteen romahtamista kuvaavissa mallilaskelmissa näyttää, että syvänveden muodostus voi voimistua arktisilla merialueilla (Sgubin ym. 2017).

Ilmakehän kiertoliike, pääosin vuoristojen vaikutuksen takia, aiheuttaa keskimäärin matalapaineen subpolaarisen pyörteen alueelle ja keskimääräisen lounaisvirtauksen Pohjois-Atlantille. Tuo vallitseva ilmakehän virtaustyyppi tuo merellistä kosteaa ilmaa talvisin lounaasta Pohjois-Eurooppaan ja jopa Arktisille alueille asti (Seager ym. 2002). Vuoristot vaikuttavat myös meren termohaliiniseen kiertoliikkeeseen (AMOC). Vuoristojen vaikutus on niin suuri, että AMOCia ei käytännössä olisi ilman vuoristoja. Sinha ym. 2012 teki mallinnuksen sekä vuorilla, että ilman. Tulos oli: AMOC-kiertoliikkeen voimakkuus vuoristoilla 18 Sv ($1 \text{ Sv} = 10^6 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$) verrattuna noin 0 Sv :iin ilman vuoristoja. Samaan aikaan kun Atlantin AMOC loppui, Tyynellemerelle syntyi termohaliininen kiertoliike. Vuoristoilla on siis taipumus pitää yllä voimakasta termohaliinista kiertoliikettä Atlantilla.

3.1. NAO ja SPG

NAO on indeksi, joka perinteisesti mittaa ilmanpaine-eroa Islannin ja etelämpänä, esimerkiksi Gibraltarilla, Lissabonissa tai Azoreiden alueella sijaitsevan tutkimusaseman välillä (kuva9). Mitä positiivisempi NAO, sitä isompi ilmanpaineiden ero ja sitä voimakkaampaa on matalapainetoiminta SPG-alueella. Jos ilmakehästä tasoitetaan matalapainetoiminnan aiheuttama vaihtelu pois, myös sekoittuneen kerroksen paksuus SPG-alueella romahtaa, kuten kuvan 8d muutos sekoitussyvytydessä näyttää (Garcia-Quintana 2019). NAO:n voimakkuus heijastuu siis suoraan syvänveden muodostukseen SPG:ssä ja sitä kautta WBC:n ja lopulta AMOCin voimakkuuteen.

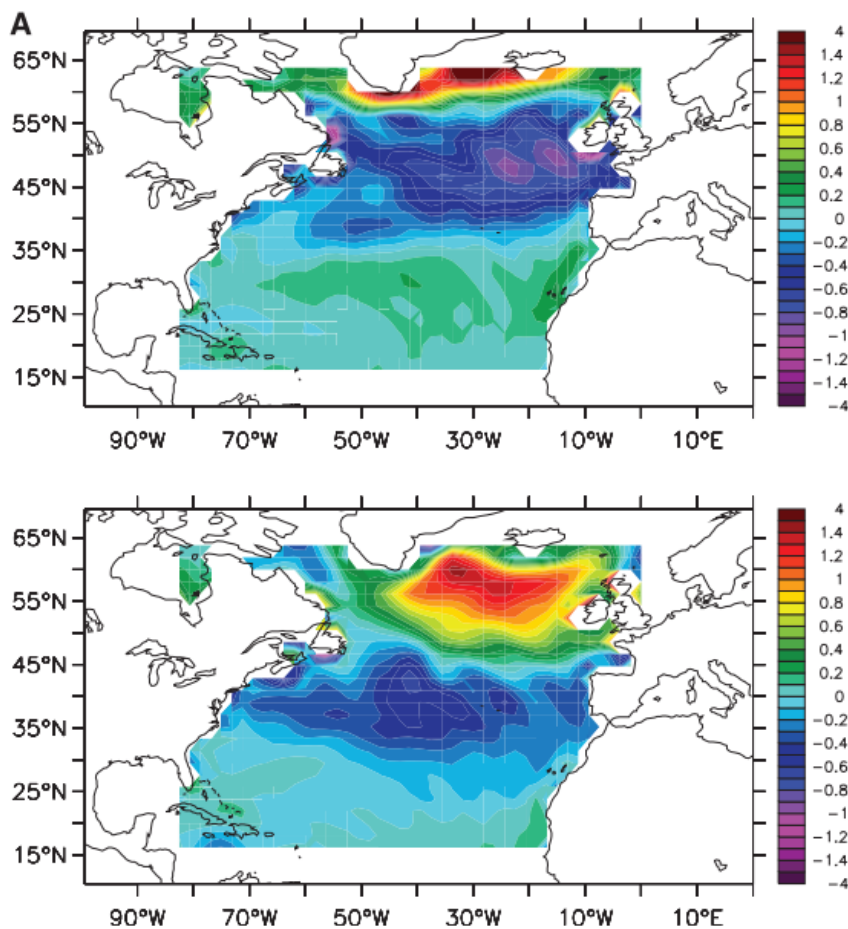
Kuvassa 9 on kaavio tästä NAO:n vaikutusketjusta, joka näkyy lopulta myös Atlantin pitkäjakoisessa AMV-vaihtelussa (Atlantic Multidecadal Variability).



Kuva 9 (Sutton ym. 2018). Kaavakuva NAO:n vaikutuksesta AMV:hen (Atlantic Multidecadal Variability). Vasemmalla on kuvattu tyypillinen NAO+-tilanne. Grönlannin kohdalla on matalapaine, Azorien seudulla korkeapaine ja välissä myrskyrata. NAO+ tilanne johtaa meren lämmönhukkaan etenkin Labradorin ja Irmingerin merillä (siniset nuolet) sekä syvään konvektioon. Voimistunut syvä konvektio johtaa meren lisääntyneeseen lämmönkuljetukseen ja voimakkaaseen AMOC:iin (punaiset nuolet vasemmassa kuvassa). Tämän seurauksena on merenpinnan lämpeneminen ja AMV+-tilanne. Auringon säteilytehon vaihtelu, tulivuoritoiminta ja ihmisperäiset aerosolit toimivat lisäpakotteina. Takaisinkytkentöjä ilmakehän ja meren välillä on muun muassa trooppisten ja subtrooppisten pilvien, Saharasta merelle lentävän pölyn sekä tuuli-haihdunta-meren pintalämpötila -kytkennän (WES, wind–evaporation–SST) kautta.

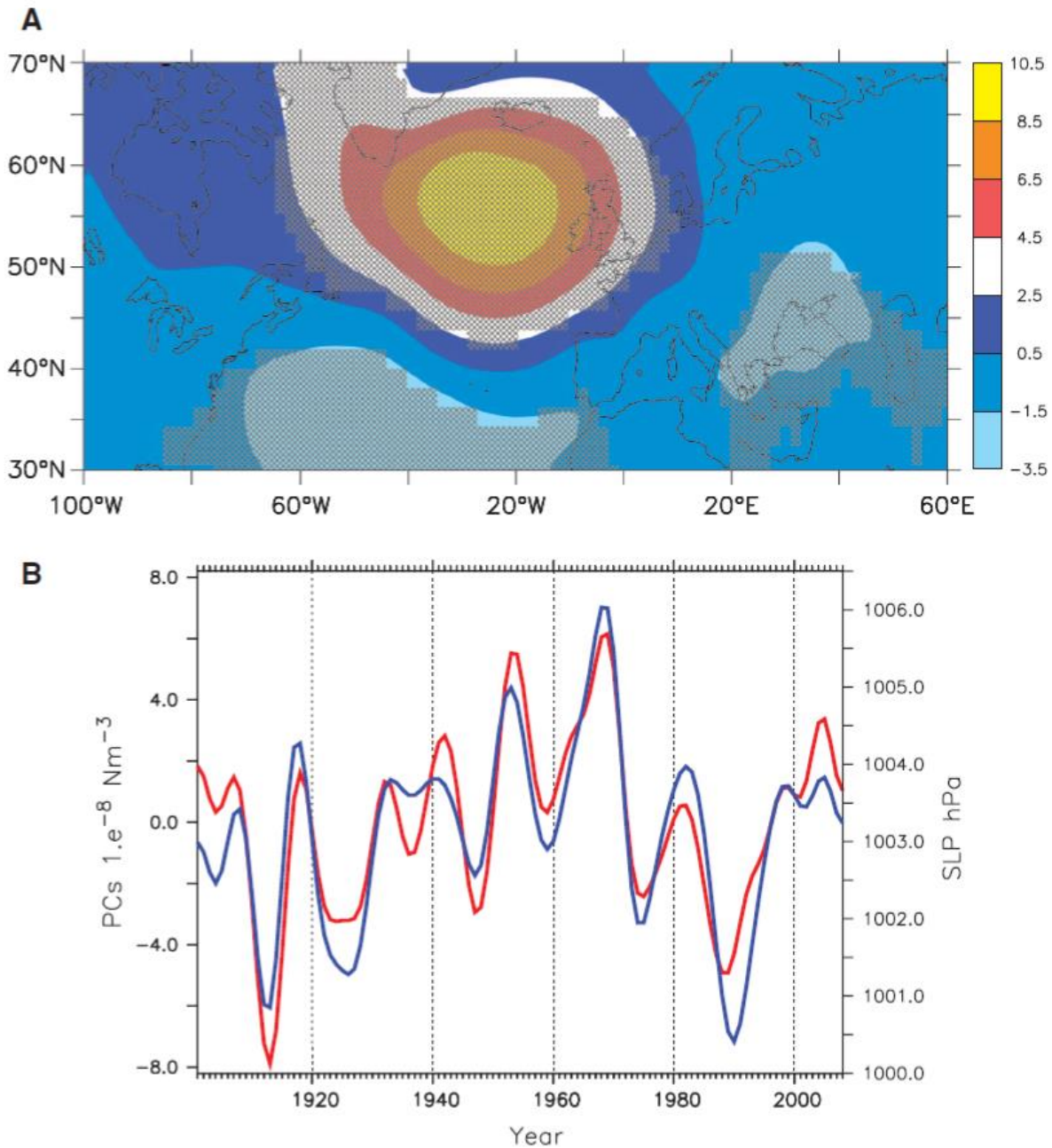
Lohmann ym. (2008) tutkivat positiivisen NAO:n vaikutusta SPG:hen ja havaitsivat alun voimistumisen jälkeen heikkenemisen noin 10 vuoden jälkeen. Heikkenemisen taustalla oli SPG:n voimistama AMOC, joka toi SPG-alueelle lämpimämpää suolaista vettä. Se taas lisäsi SPG:n kerrostuneisuutta, heikensi konvektiota ja SPG:tä.

Vaikuttaako meri NAO:on ja mitkä muut tekijät siihen vaikuttavat, on epäselvempi juttu. Sekä Häkkinen ym. (2011) että Gastineau ja Frankignoul (2015) päätyivät siihen, että lämmin vesi Pohjois-Atlantilla esiintyy useammin yhtä aikaan negatiivisen NAO:n ja jopa blocking-tilanteiden kanssa ja kylmä Pohjois-Atlanti positiivisen NAO:n. NAO ei kuitenkaan ole paras mahdollinen ilmaston vaihtelevuuden kuvaaja, kun mietitään SPG:n ja ilmaston vuorovaikutusta. Häkkinen ym. (2011) erottivat pääkomponenttimenetelmällä kaksi hallitsevinta Pohjois-Atlantin virtauksen vaihtelutyyppiä (kuva 10). Niistä kuvassa ylempi liittyy NAO:on ja alempi SPG:n vaihteluihin. Alemman kuvan pintatuulijännitteen pyörteisyys muistuttaa suuressa mittakaavassa meren keskimääräisiä pyörteitä. Kutsun sitä SPG-virtaustyyppiä. SPG-virtaustyyppiin liittyy myrskyradan siirtyminen etelämmäksi. Se vaikuttaa meren kiertoliikkeeseen SPG-alueella pintatuulijännitteen kautta.



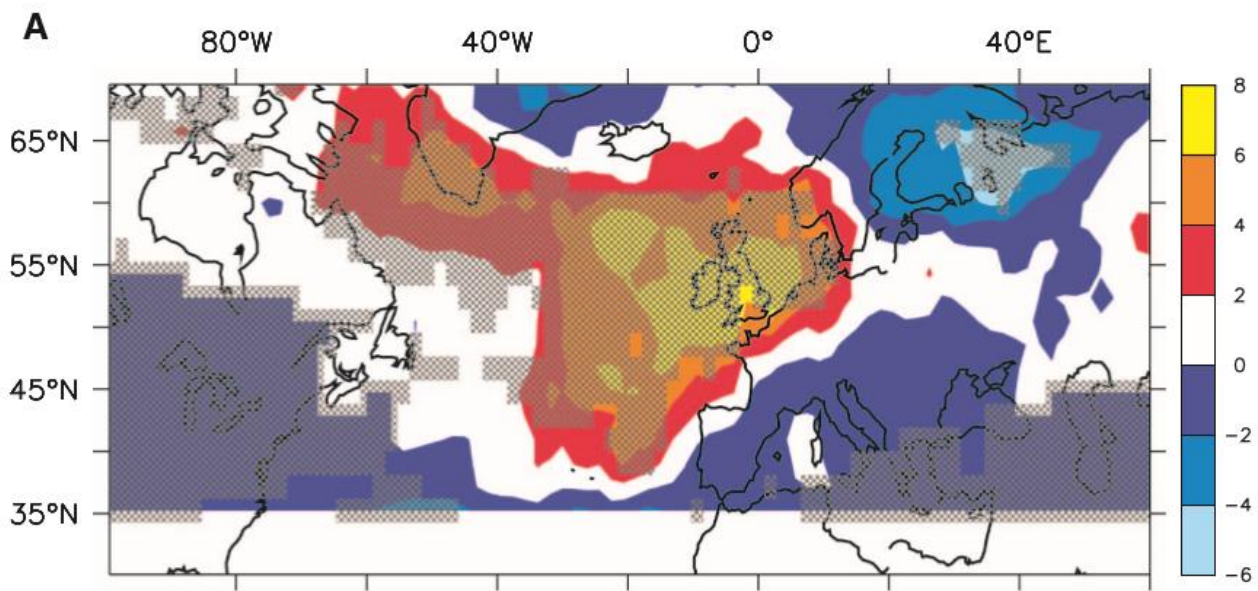
Kuva 10 (Häkkinen ym. 2011). Pintatuulijännitteen pyörteisyyden vaihtelevuus talvisin (joulu-maaliskuu) 1900-luvulla. Kaksi hallitsevinta pääkomponenttimenetelmällä saatua virtauksen vaihtelutyyppiä. Ylempi edustaa 22.3%:a pintatuulijännitteen pyörteisyyden vaihtelevuudesta ja muistuttaa NAO-tyyppistä vaihtelua. Alemmaan liittyy 15.6% vaihtelusta ja se on muodoltaan lähellä subtrooppista ja subpolaarista meren pyörteitä.

Kun SPG-virtaustyyppin negatiivisista tilanteista vähennetään positiiviset ja näistä muodostetaan pintapainekuva, saadaan kuva 11a. Se ei muistuta NAO-tyyppistä vaihtelua paljoakaan, mutta korreloi hyvin SPG:n pintapaineen kanssa, kuten kuvasta 11b näkyy.



Kuva 11 (Häkkinen ym. 2011.) (a) SPG-virtaustyyppin negatiivisten ja positiivisten tilanteiden pintapaineiden erotus (hPa). Pintapaineanomalia liittyy heikentyneeseen subpolaaripyörteeseen. Varjostus alueella, jolla ero on 95% tasolla merkitsevä. (b) Sininen käyrä on subpolaarisen alueen (20°W- 50°W ja 50°N- 65°N) keskimääräinen pintapaine ja punainen käyrä pintatuulijännitteen pyörteisyyden SPG-komponentin (kuvan 10 alaosa) amplitudi.

Jos tehdään sama havaituille blocking-tilanteille kuin kuvan 11a pintapaineelle saadaan kuva 12. Siinä erottuu, kuinka heikomman SPG:n tapauksessa blocking-tilanteet yleistyvät Britteinsaarilta Grönlannin kärkeen ulottuvalla alueella. Suomen seutuvilla taas on keskimääräistä vähemmän blocking-tapahtumia. Häkkinen ym. ei kuitenkaan ota kantaa siihen, kuinka tämä yhteys ilmakehän blocking-aktiviteetin ja SPG:n välille syntyy.



Kuva 12 (Häkkinen ym. 2011). SPG-virtaustyyppin negatiivisten ja positiivisten tilanteiden blocking-päivien lukumäärän erotus 1901–2008 näyttää, että blocking-aktiviteetti Grönlannin eteläkärjestä Länsi-Eurooppaan on suurempi samaan aikaan, kun subpolaaripyörre on heikko. Varjostus alueella, jolla ero on 95% tasolla merkitsevä.

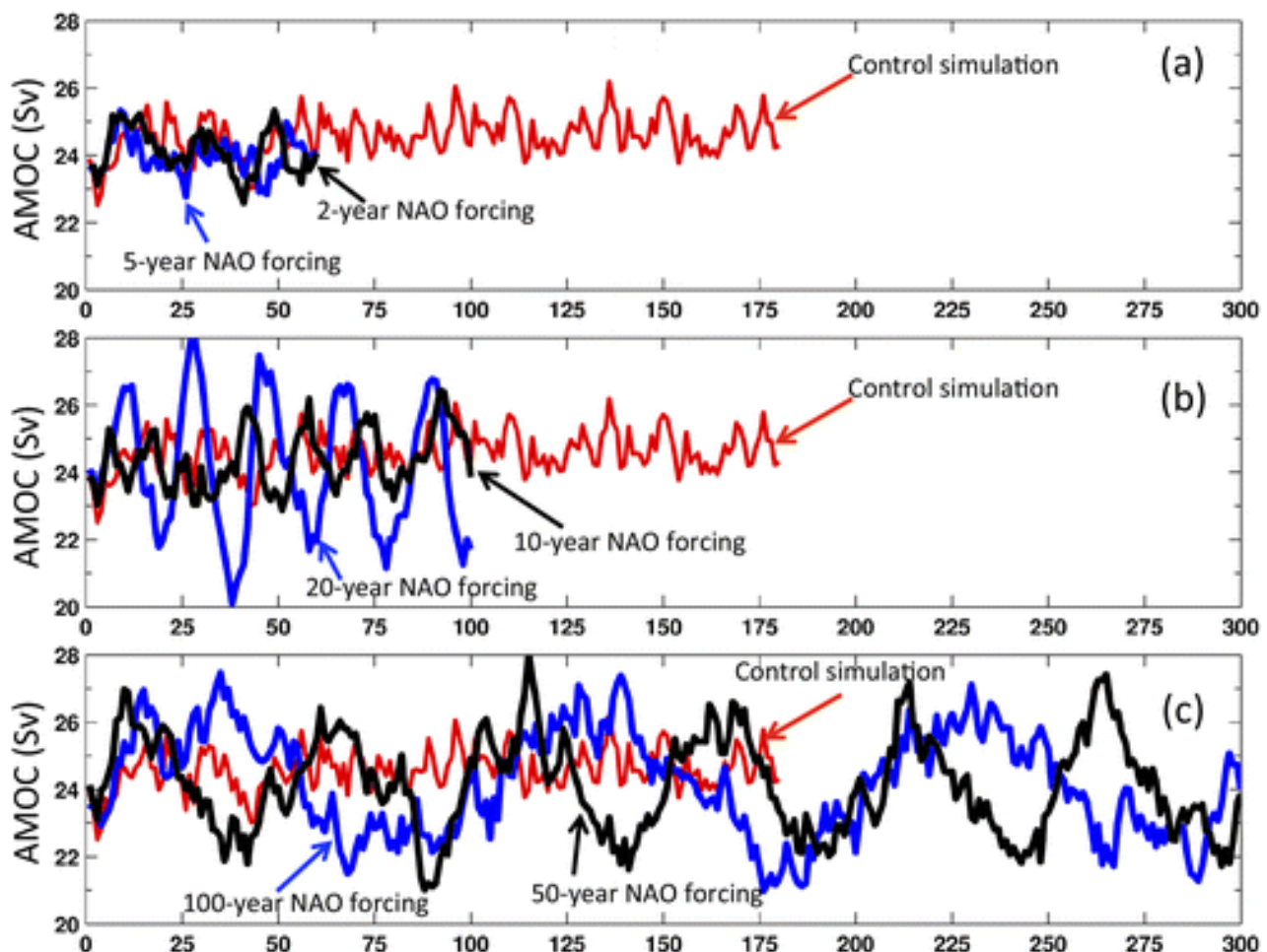
Lisäksi NAO:n voimakkuuteen on liitetty lukuisia muita vaikuttavia tekijöitä kuten ENSO, Arktinen jääpeite, auringon aktiivisuuden vaihtelut, lumipeite ja stratosfäärin kautta tulevat vaikutukset.

Seuraavassa kappaleessa käsitellään SPG:n vaikutuksia AMOC:iin.

3.2. AMOC

Perinteisen näkemyksen mukaan NAO:n aikaansaamat muutokset syvänveden muodostuksessa SPG:n alueella johtavat muutoksiin AMOC:ssa. Delworth ja Zeng (2016) tutkivat kolmella eri ilmastomallilla 2, 5, 10, 20, 50 ja 100 vuoden periodin NAO-pakotteen vaikutusta AMOC:iin (kuva 13). He määrittivät AMOC-indeksin virtafunktion vuosikeskiarvon maksimiksi 20° ja 65°N välillä

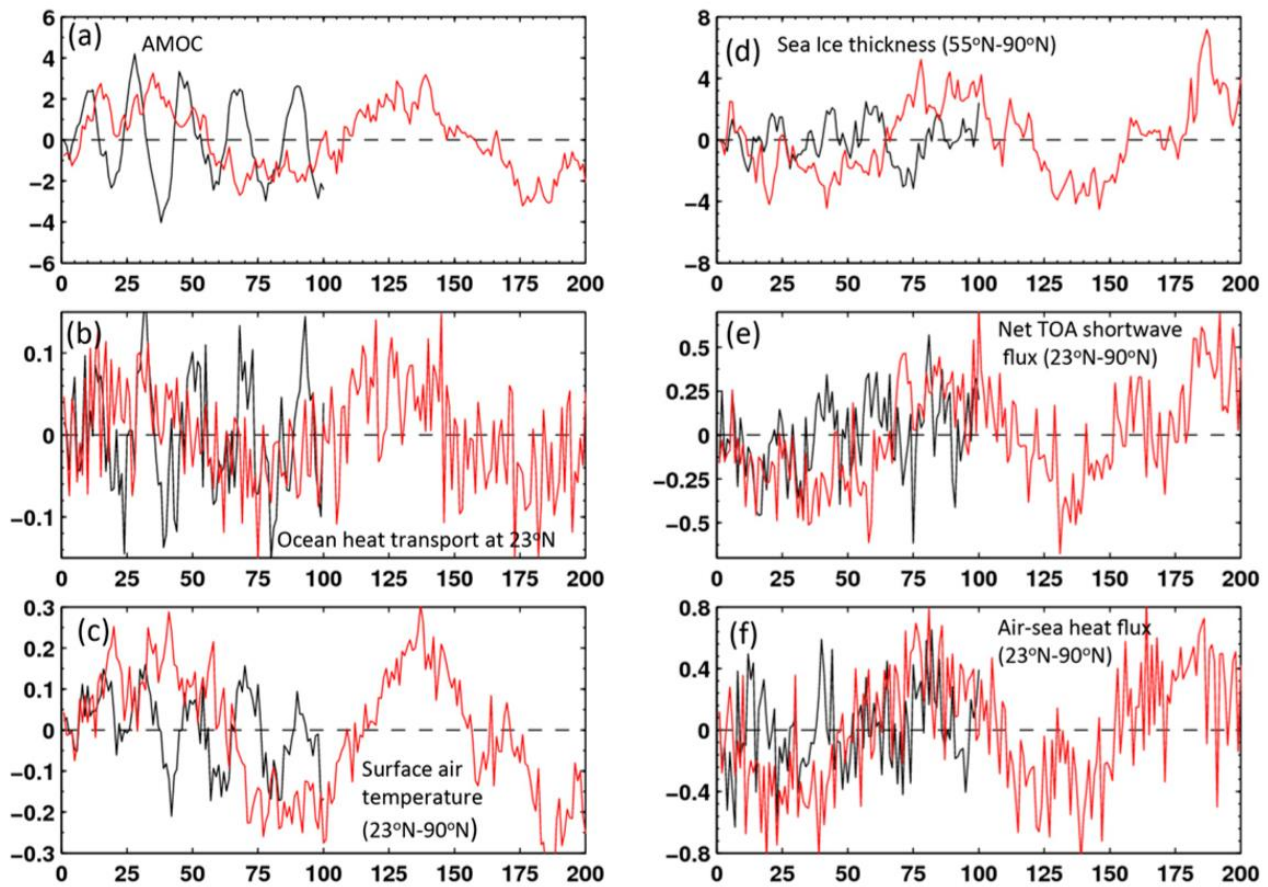
Pohjois-Atlantilla. NAO-pakote muodostettiin ECMWF:n pintavuoanalyysistä (ilmakehän ja meren lämmön, veden ja liikemäärän vaihto) ja NAO-indeksistä (Lissabonin ja Reykjavikin välillä). Malleihin lisättiin näin muodostettua NAO-tyyppistä pakotetta joulukuun–maaliskuun välillä. Alle 10 vuoden vaihtelut NAOssa eivät saaneet aikaan merkittävää muutosta AMOCissa ja toisaalta 20 vuoden ja sitä pidemmän aikavälin NAO-pakotteen aiheuttama amplitudi AMOCissa pysyi yhtä suurena.



Kuva 13 (Delworth ja Zeng 2016). AMOC-indeksi (virtafunktion vuosikeskiarvon maksimi 20° ja 65°N välillä Pohjois-Atlantilla). Punainen käyrä on 10 jäsenen ryväsajon kontrollisimulaatio. (a) Musta (sininen) käyrä näyttää 10 jäsenen ryväsajon AMOC-keskiarvon 2 (5) vuoden NAO-pakotteella. (b) Musta (sininen) käyrä näyttää 10 jäsenen ryväsajon AMOC-keskiarvon 10 (20) vuoden NAO-pakotteella. (c) Musta (sininen) käyrä näyttää 10 jäsenen ryväsajon AMOC-keskiarvon 50 (100) vuoden NAO-pakotteella.

Vaikka AMOC-vaihtelun amplitudi olikin yhtä suuri sekä 20 että 100 v. vaihtelulla, vaikutukset ilmastoon kasvoivat merkittävästi NAO-pakotteen jaksonajan kasvaessa (kuva 14). Tämä vaikuttaa luonnolliselta, pidempään jatkuva tilanne kasaa seurauksia ilmastoon. Merijään ja lumipeitteen

vähentäminen aiheuttivat positiivisen takaisinkytkennän, joka voimisti NAO-pakotteen vaikutuksia ilmastoon pidemmällä aikavälillä.



Kuva 14. Eri suureiden aikasarjoja, kun Delworthin ja Zengin (2016) malli altistettiin 20 v. (musta) ja 100 v. (punainen) NAO-pakotteelle. Jokainen aikasarja on 10-jäsenen ryppään keskiarvon ja kontrollisimulaation erotus. 20 v. (100 v.) pakotekoe on pituudeltaan 100 v. (200 v.): (a) AMOC-indeksi (Sv), (b) meridionaalinen lämmönkuljetus (10^{15} W) leveyspiirillä 23°N , (c) pintalämpötilan (K) keskiarvo 23°N leveyspiirin pohjoispuolella, (d) merijään keskimääräinen paksuus (cm) 55°N pohjoispuolella, (e) vuoden keskimääräinen lyhytaaltosäteily ylöspäin ilmakehän ylälaidalla (W m^{-2}) 23°N pohjoispuolella ja (f) keskimääräinen lämmönvuo merestä ilmakehään (W m^{-2}) 23°N pohjoispuolella

Sevellecín ym. (2017) mukaan vuosikymmenien tai sitä pidemmän AMOCin vaihtelun ratkaiseva tekijä on muutokset arktisella alueella. He altistivat ilmastomallin samankaltaiselle pakotteelle kuin minkä tähänastinen arktisen merijään sulaminen aiheuttaa. Nimenomaan kutistuva merijää lisää lämmönvuota mereen, muuttaa pintavettä lämpimämmäksi ja kevyemmäksi ja pienentää AMOCiin liittyvää syvänveden muodostusta. Ensimmäisen 40 vuoden jälkeen lisääntyvän makean veden

määrä muuttui jään sulamisen vuoksi yhtä tärkeäksi kuin lämmönvuo. Sadan vuoden jälkeen AMOC oli heikentynyt 50%.

Suorista havainnoista saatavat aikasarjat kattavat niin lyhyen ajan, ettei niistä vielä tällä hetkellä saa selvää vahvistusta linkille NAO-SPG-AMOC. Viime aikoina on havaittu pikemminkin SPG-AMOC-yhteyden heikkenemistä. Vähitellen yhä suurempi osa AMOCin lämpimästä haarasta on kääntynyt takaisin subtrooppiseen pyörteeseen. Samaan aikaan syvän läntisen reunavirtauksen (DWBC) vedestä suurempi osa on jäänyt kiertämään SPG:hen (Bryden ym. 2019, Smeed ym. 2018). Ainoastaan syvimmän konvektion aikana syntyvä alempi Pohjois-Atlantin syvävesi (LNADW) etenee subtrooppiselle alueelle ja vaikuttaa siellä. Ylempi syvä vesi (UNADW) jää lähinnä kiertämään SPG:n alueelle ja sen läheisyyteen (Zou ja Lozier 2016, Zou ym. 2019). Yhteys SPG:n ja AMOC:in eteläosan välillä on siis viimeisten vuosikymmenten suorien havaintojen valossa epäselvä.

4. Pohjois-Atlantin kiertoliike viime vuosikymmeninä

Monissa mallinnuksissa on tutkittu etenkin 1970-luvun kylmää kautta ja pientä jääkautta. Menneet muutokset eivät kuitenkaan sovi kuvaamaan sitä, mitä lämpenevässä ilmastossa tapahtuu, mikäli subpolaaripyörre heikkenee merkittävästi. Lisääntynyt kasvihuonekaasujen määrä muuttaa taustatilannetta ja esimerkiksi 1970-luvun kylmään kauteen liittyi paljon juuri siihen ajankohtaan liittyviä pakotteita, jotka vaikuttivat kylmenemiseen (kuva 15). Menneisyyttä ja ilmastomallien kuvaa menneestä vertaamalla voidaan kuitenkin arvioida, kuinka hyvin mallit kuvaavat muutoksia subpolaaripyörteen alueella.

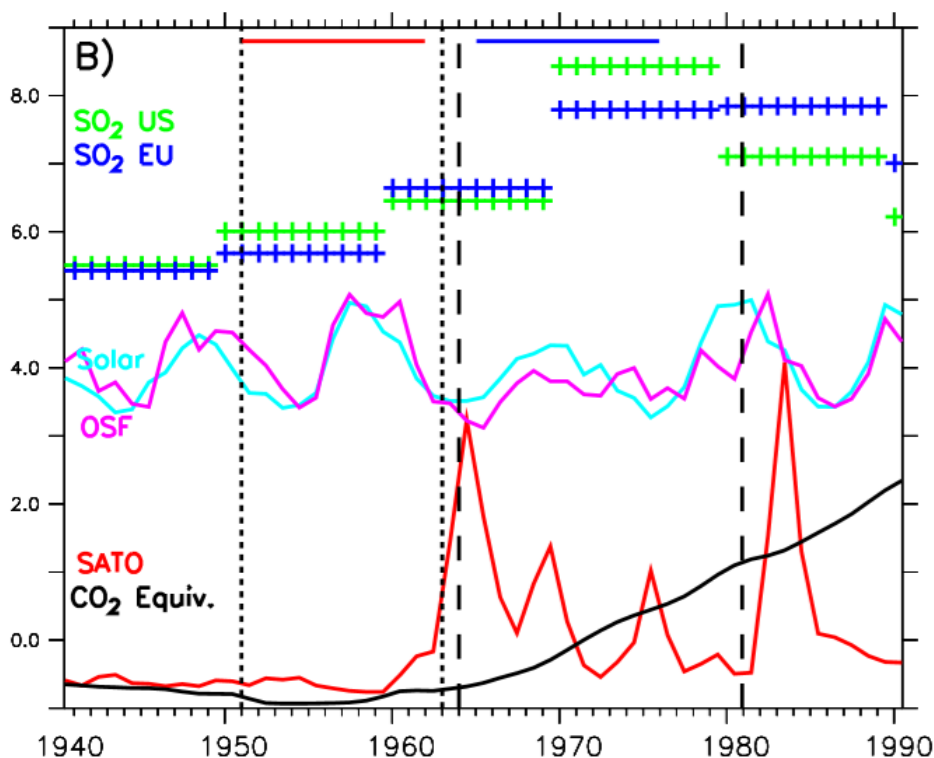
4.1. 1970-luvun kylmä anomalia

1970-luvun kylmä vaihe Pohjois-Atlantilla on alueen merkittävin lämpötilapoikkeama viime vuosisadalla. Se on vaikuttanut käsitykseemme Atlanttiiin liittyvästä noin 70 vuoden jaksollisesta vaihtelusta. Kuvassa 16a näkyvässä AMO-indeksissä (Atlantic Multidecadal Oscillation) 1970-luku erottuu kylmimpänä ajanjaksona koko päiväntasaajan pohjoispuolisella alueella. Kylmeneminen oli kuitenkin suurinta SPG-alueella ja voimakkaimmillaan yli 1°C. Alkuperäistä kylmenemistä seurasi viileä jakso, joka ulottui 90-luvun puolelle. 1970-luvun kylmeneminen alkoi 1964-68 Golf-virran jatkeesta Bostonin ja New Yorkin edustalta ja Islannin itäpuolelta. Islannin itäpuolelta kylmeneminen levisi subpolaaripyörteeseen ja lopulta koko Pohjois-Atlantille (Hodson ym. 2014).

Mietittäessä mahdollista tulevaa SPG:n romahtamista tuntuu luonnolliselta tarkastella edellistä, kohtuullisen hyvin dokumentoitua kylmenemistä. Kasvihuoneilmiön voimistumista kuvaavissa mallinnuksissa kuitenkin Norjanmeri ja Barentsinmeri, joista 1970-luvun kylmeneminen alkoi, lämpenevät huomattavasti. Vähän lämpenemistä alueella tapahtuu myös subpolaaripyörteen romahtamista kuvaavissa malliajoissa (kuva26). Tästä tulee sellainen kuva, ettei SPG:n mahdollinen tuleva romahtaminen syntyisi samaan tapaan kuin 1970-luvun kylmeneminen, eikä aiheuttaisi täysin samoja ilmastollisia vaikutuksia.

1970-luvun kylmän anomalian perussyistä ollaan vielä epävarmoja, mutta vahvimmin asiaan vaikuttaneet asiat ovat (Hodson ym. 2014): (1) Suuri negatiivinen suolaisuusanomalia, joka eteni todennäköisesti Framin salmesta Norjanmerelle ja sieltä edelleen SPG-alueelle, (2) aikaisempi SPG:n lämpeneminen, joka saattoi johtaa AMOCin heikkenemiseen ja (3) rikkidioksidipäästöt. Nämä pakotteet eivät tulevassa ilmastossa voi toteutua samalla tavoin kuin 1970-luvulla.

Rikkidioksidipäästöjä ei enää juuri ole Pohjois-Atlantin ympäristössä, eli niiden viilentävä vaikutus puuttuu tällä vuosituhannella. SPG:n lämpeneminen ja kylmeneminen tapahtuvat nykyään kasvavien kasvihuonekaasupäästöjen ympäristössä. Näin ollen, vaikka AMOC on ilmastonmuutoksen vuoksi heikkenemässä, seuraukset ilmastoon voivat olla aivan toisenlaisia kuin menneisyydessä. Sama pätee myös suolaisuusanomaliaan SPG:n alueella. Grönlannin jäätikön sulamisesta kertynyt vesimäärä oli vuosina 1993-2016 noin puolet 1970-luvun suuren suolaisuusanomalian määrästä (Dukhovskoy ym. 2019). Lisäksi heikkenevä AMOC tuo vähemmän suolaista vettä pohjoiseen ja sademäärät pohjoisilla alueilla voivat lisääntyä. Tämä Arktisen alueen ja SPG:n muuttuminen suolattommaksi ei kuitenkaan tapahdu koostumukseltaan samassa ilmakehässä kuin menneisyydessä, eikä aiheuta siis välttämättä samankaltaisia seurauksia. Lisäksi 1970-luvun kylmenemiseen vaikutti myös muita juuri tuohon ajankohtaan liittyviä tekijöitä, jotka on summattu kuvassa 15. Agungin tulivuori purkautui 1963/64 ja heikommät tulivuorenpurkaukset esiintyivät vuosina 1968/69 ja 1975. Vaikka suora auringon säteilyä heikentävä vaikutus ei kestänyt purkauksien vuoksi montaa vuotta, se on voinut vaikuttaa yleiseen meren ja ilmakehän virtaukseen. Kuvassa 15 näkyy myös auringon säteilyn heikentyminen 1960-luvun alussa, joka lisäksi sattui osumaan tuohon ajankohtaan. Ihmisen aiheuttama kasvihuonekaasujen lisääntyminen ei tuossa vaiheessa ollut vielä niin merkittävä, että se olisi ehkäissyt kylmenemistä.



Kuva 15 (Hodson ym. 2014). Aikasarjoja 1970-luvun kylmenemiseen vaikuttaneista ulkoisista pakotteista. Vihreä risuaita: SO₂-päästöt Yhdysvaltojen alueelta ja sininen EU-alueelta. Vaaleansininen viiva on CMIP5-malleissa käytetty auringon säteilytehon vaihtelu, violetti viiva vaihtoehtoinen auringon aktiivisuuden mittari (open solar flux). Punainen viiva on tulivuorten purkausten aiheuttama globaali keskimääräinen stratosfäärin optinen paksuus. Musta käyrä on CO₂-ekvivalenttina ilmaistu ihmisen aiheuttama pakote (kasvihuonekaasut ja aerosolit). Kunkin aikasarjan vaihtelut on skaalattu niin, että keskihajonnaksi tulee 1. Y-akselilla on siis dimensiottomia lukuja ja yhden yksikön muutos merkitsee aina yhden keskihajonnan suuruista muutosta alkuperäisessä aikasarjassa. Kuvan perusteella ei siis voi verrata eri aikasarjojen absoluuttisia arvoja eikä vaihtelun suuruutta, vaan ainoastaan sitä, miten vaihtelut osuvat ajallisesti yhteen. Pystypisteviivat ja katkoviivat liittyvät tutkimuksessa käytettyyn lämpimään (1951–62) ja kylmään (1964–80) vertailujaksoon.

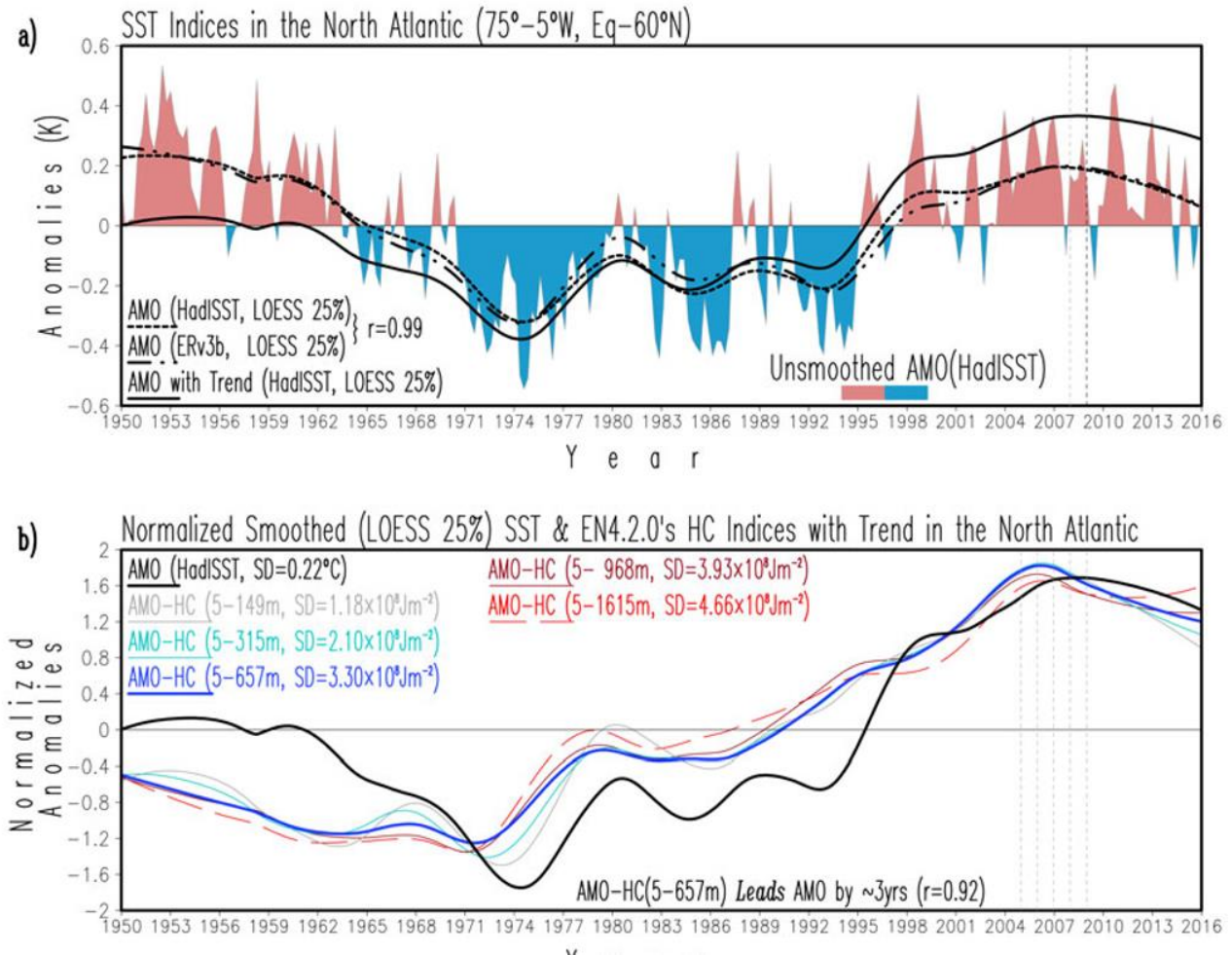
Bellucci ym. (2017) tutkivat 1970-luvun kylmää anomaliaa CMIP5-ilmastomalleilla. Käytettävät mallit rajattiin niihin, joista oli saatavissa vähintään kolmen jäsenen rypäs historiallisia malliajoja. Näin saatu 13 mallin joukko jakautui kolmeen ryhmään tavassaan kuvata Pohjois-Atlantin tapahtumia 1970-luvulla. Ainoastaan viisi mallia onnistui kuvaamaan 1970-luvun kylmenemisen ja myöhemmän lämpenemisen kohtalaisen uskottavasti. Tarkemmassa analyysissä ratkaisevaksi osoittautui ihmisen aiheuttamien aerosolien vaikutus ilmastomalleissa. 1970-luvun kylmeneminen ei siis olisi voinut tapahtua ilman ihmisen aiheuttamia massiivisia rikkidioksidipäästöjä, jos tilannetta parhaiten kuvaavissa viidessä CMIP5-ilmastomallissa kylmeneminen johtui samoista syistä kuin todellisuudessa.

4.2. 1970-luvun jälkeinen kehitys subpolaaripyörteessä ja AMOCissa

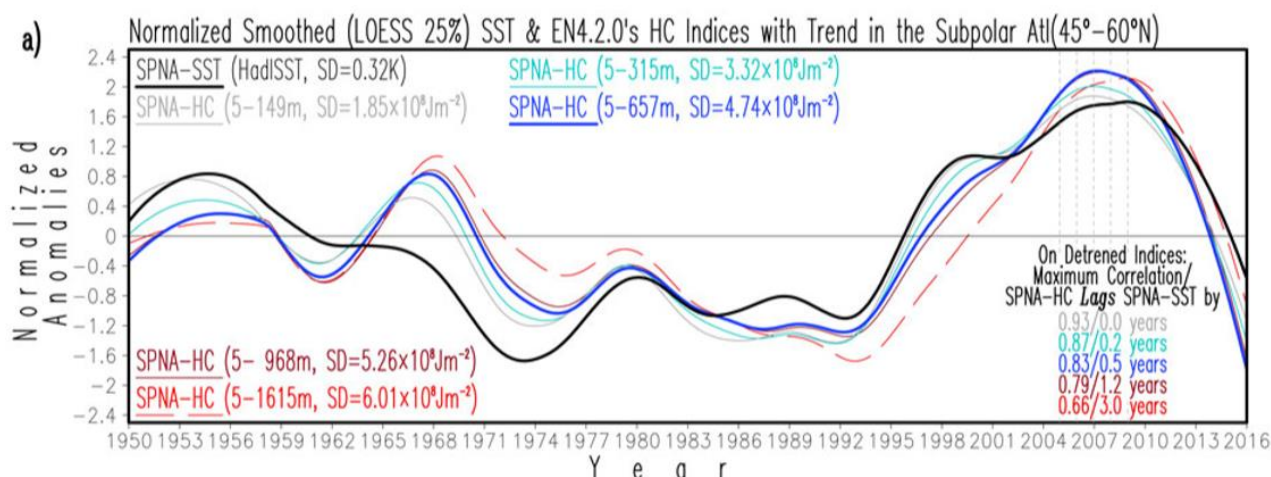
1970-luvun kylmenemiseen liittyi suuri suolaisuusanomalia, joka toi valtavasti makeaa vettä ja merijäätä Framin salmen kautta SPG:n alueelle. 1980-luvulla esiintyi toinen suolaisuusanomalia ja 1990-luvun alussa vielä kolmas. Nämä syntyivät kuitenkin Labradorinmeren puolella, eli eri tavalla kuin 1970-luvun anomalia (Belkin ym. 1998). SPG:n kylmät ja vähäsuolaiset olot jatkuivat vielä 1990-luvun alkuun asti, ennen kuin alueen lämpeneminen alkoi.

1990-luvulla alkanut lämpeneminen jatkui Pohjois-Atlantilla aina vuoteen 2005 asti (Ruiz-Barradas ym. 2018, Robson ym. 2016). Lähes samaan tahtiin lämpenemisen kanssa myös SPG:n suolaisuus

kasvoi. Ruiz-Barradas ym. tutkivat Pohjois-Atlantin ja SPG-alueen kehitystä viime vuosikymmeninä (kuva 16 ja 17). He muodostivat syvemmästä vedestä lämpösisältöindeksin sekä Pohjois-Atlantille että SPG-alueelle (heillä SPNA-lyhenne, subpolar North-Atlantic).



Kuva 16 (Ruiz-Barradas ym. 2018) AMO (Atlantic Multidecadal Oscillation) -indeksit v. 1950–2015. Indeksit on luotu ottamalla aluekeskiarvo merenpinnan lämpötilasta ja lämpösisällöstä Pohjois-Atlantilla (75°W–5°W, 0°–60°N). (a) Pitkän aikavälin kehitys on poistettu kuvan muista paitsi yhtenäisestä mustasta viivasta. Väritys: tasoittamaton AMO, musta katkoviiva ja katkopisteviiva ovat kahdesta eri analyysistä saadut tasoitetut aikasarjat (yksikkö K). (b) Kuvan käyrät on tasoitettu ja pitkän aikavälin trendi on käyrissä mukana. Paksu musta viiva on merenpinnan lämpötilaan (HadISST-analyysi) perustuva normalisoitu AMO-indeksi ja värilliset viivat meren lämpösisältöön pohjautuvia normalisoituja AMO-HC-indeksejä. Lämpösisältöindeksit on laskettu seuraaville syvyyksille: 5–149 m (ohut harmaa viiva), 5–315 m (ohut sininen viiva), 5–657 m (paksu sininen viiva), 5–968 m (ohut punainen viiva), 5–1615 m (ohut katkoviiva).



Kuva 17 (Ruiz-Barradas ym. 2018) Subpolaarisen Pohjois-Atlantin (SPNA; 60°W–10°W, 45°N–60°N) pintalämpötilan ja lämpösisällön indeksit vuosille 1950–2015. Käyrät on normalisoitu ja niissä on pitkän aikavälin trendi mukana. Paksu musta viiva on merenpintalämpötila-anomalia ja värilliset viivat meren lämpösisältöanomaliat kerroksille 5–149 m (harmaa), 5–315 m (ohut vaaleansininen), 5–657 m (paksu sininen), 5–968 m (ohut punainen) ja 5–1615m (ohut punainen pilkkuviiva). Normalisointi on tehty jakamalla tasoitettu indeksi sen keskihajonnalla. Maksimikorrelaatiot pintaaindeksiin ja syvempien indeksien välillä on kuvattu oikeassa alakulmassa. Pinta-anomaliat edeltävät syvempien kerrosten anomaliaita SPG-alueella.

Kun verrataan kuvan 16b AMO-käyriä, joista ei ole poistettu ilmastonmuutoksen aiheuttamaa lämpenemistrendiä ja kuvan 17 SPG-käyriä, tulos näyttää ennen kokemattomalta. Vaikka meren pintalämpötila onkin kääntynyt koko Pohjois-Atlantilla keskimäärin hienoiseen laskuun vuoden 2005 jälkeen, lämpötila on yhä yli yhden keskihajonnan korkeampi, kuin keskimäärin koko ajanjaksolla 1950-luvulta alkaen (kuva 16b). Lisäksi syvimmässä kerroksessa on 2010 jälkeen merkkejä lievistä lämpenemisestä. Samaan aikaan SPG-alueella lämpötila oli romahtamassa alimmalle tasolle (kuva 17). Pohjois-Atlantti näyttää siis siirtyneen tilaan, jolle ei löydy vertailukohtaa havainnoista. SPG-käyrään kuitenkin vaikuttaa suuresti lopun poikkeuksellinen kylmeneminen, niin kutsuttu ”Big Blue Blob”. Siinä vuosien 2013-2014 ja 2014-2015 talvina subpolaaripyörteen alueella tapahtui valtava lämmönvuo merestä ilmakehään (Josey ym. 2017). Lämmönvuon poikkeama keskimääräisestä oli 100 Wm^{-2} ja merivesi kylmeni vuoden 2015 loppuun mennessä jopa 2.5 astetta 250 m syvyydessä. Tämä lämmönvuo johtui poikkeuksellisesta virtaustyyppistä ilmakehässä kahtena peräkkäisenä talvena. Kun tarkastellaan yksittäisiä SPG:n kylmenemisiä viime vuosikymmeninä, erottuu kuitenkin kaksi erillistä tapaa kylmenemiselle.

Toinen on edellä kuvattu ilmakehän kiertoliikkeestä johtuva poikkeava lämmönvuo, toinen liittyy AMOCin heikkenemiseen. Vuosina 2009-2010 havaittu toinen kylmä anomalia oli huipussaan vain 0.8°C, mutta ulottui jopa 2 km syvyyteen. Se syntyi etelämmäksi kuin ”Big Blue Blob” ja samaan aikaan havaittiin AMOCin heikkeneminen 18.8 Sv:stä 15.9 Sv:iin (Smeed ym. 2018).

Ilmastomuutos on jo saattanut vaikuttaa molempiin tapoihin, joilla SPG-alue on kylmentynyt viime vuosikymmeninä. Arktinen jääpeite on sulanut viime vuosikymmeninä. Sevellec ym. (2017) osoitti, että muutokset Arktisen alueen lämmönvuossa ja meriveden suolaisuudessa ovat yli 20 vuoden aikaskaalassa merkittävän AMOCiin vaikuttava tekijä. Lyhyemmällä aikaskaalalla SPG-alueen lämmönvuo ja suolaisuus olivat ratkaisevammat. Ennusteiden mukaan Arktinen alue muuttuu jatkossa suolattomammaksi ja yhä suurempi osuus makeammasta vedestä tulee pohjois-Atlantille Kanadan salmien kautta, eikä Framin salmesta (Koenigk ym. 2007).

Toinen tapa, jolla ilmastomuutos voi vaikuttaa Pohjois-Atlantin kiertoliikkeeseen on kasvava lämpötilaero mantereen ja meren välillä. Manteret lämpenevät ilmaston muuttuessa meriä nopeammin ja meret muuttuvat siis suhteellisesti kylmemmiksi mantereisiin nähden.

Edellisissä kappaleissa kuvatun vuorovaikutuksen monimutkaisuus ja havaintojen puutteellisuus kertoo, että ainoa tapa päästä arvioimaan mitä SPG-alueen tulevaisuutta on ilmastomallien käyttö. Seuraavaksi tarkastelemme IPCC:n CMIP5-projektin (Fifth Coupled Model Intercomparison Project) mallien kykyä kuvata oleellisia piirteitä SPG:ssä ja teemme koeasetelman, jolla arvioimme SPG:n mahdollisen romahduksen vaikutuksia Euroopan ilmastoon.

5. Koeasetelma

5.1. Käytettävissä olevat mallit ja skenaariot

IPCC:n CMIP5 arkistossa on noin 40 ilmastomallin tulokset. Mallien resoluutio vaihtelee. Ilmakehässä tyypillinen resoluutio on 1-2 astetta ja 30-40 tasoa (joissain jopa 80 tai enemmän). Meren tyypillinen resoluutio on 1 aste ja 30-60 tasoa. Taulukossa 2 on lueteltuna käytössä olevat CMIP5-mallit. Taulukkoon on merkitty punaisella mallit, joissa tapahtuu ainakin yksi SPG-romahdus ja sinisellä kaksi mallia, joissa koko AMOC sammuu.

CMIP5

| Model name | | AOGCM | | | | FC | ESM | | | |
|------------------------------------|-----------|-------|--------------|-------|---------|----|---------|------------|-------------|-----------|
| | | Atmos | Land Surface | Ocean | Sea-Ice | | Aerosol | Atmos Chem | Land Carbon | Ocean BGC |
| ACCESS1.0, ACCESS1.3 | Australia | | | | | | | | | |
| BCC-CSM1.1, BCC-CSM1.1(m) | China | | | | | | | | | |
| BNU-ESM | China | | | | | | | | | |
| CanCM4 | Canada | | | | | | | | | |
| CanESM2 | | | | | | | | | | |
| CCSM4 | | | | | | | | | | |
| CESM1 (BGC) | | | | | | | | | | |
| CESM1 (WACCM) | USA | HT | | | | | | | | |
| CESM1 (FASTCHEM) | | | | | | | | | | |
| CESM1 (CAM5) | | | | | | | | | | |
| CESM1 (CAM5.1-FV2) | USA | | | | | | | | | |
| CMCC-CM, CMCC-CM5 | Italy | HT | | | | | | | | |
| CMCC-CESM | | HT | | | | | | | | |
| CNRM-CM5 | France | | | | | | | | | |
| CSIRO-Mk3.6.0 | Australia | | | | | | | | | |
| EC-EARTH | Europe | | | | | | | | | |
| FGOALS-g2 | China | | | | | | | | | |
| FGOALS-s2 | China | | | | | | | | | |
| FIO-ESM v1.0 | China | | | | | | | | | |
| GFDL-ESM2M, GFDL-ESM2G | | | | | | | | | | |
| GFDL-CM2.1 | USA | | | | | | | | | |
| GFDL-CM3 | | HT | | | | | | | | |
| GISS-E2-R, GISS-E2-H | USA | HT | | | | | p2, p3* | p2, p3* | | |
| GISS-E2-R-CC, GISS-E2-H-CC | | HT | | | | | p2, p3* | p2, p3* | | |
| HadGEM2-ES | | | | | | | | | | |
| HadGEM2-CC | UK | HT | | | | | | | | |
| HadCM3 | | | | | | | | | | |
| HadGEM2-AO | Korea | | | | | | | | | |
| INM-CM4 | Russia | | | | | | | | | |
| IPSL-CM5A-LR / -CM5A-MR / -CM5B-LR | France | HT | | | | | | | | |
| MIROC4h, MIROC5 | | HT | | | | | | | | |
| MIROC-ESM | Japan | HT | | | | | | | | |
| MIROC-ESM-CHEM | | HT | | | | | | | | |
| MPI-ESM-LR / -ESM-MR / -ESM-P | Germany | HT | | | | | | | | |
| MRI-ESM1 | | HT | | | | | | | | |
| MRI-CGCM3 | Japan | HT | | | | | | | | |
| NCEP-CFSv2 | USA | | | | | | | | | |
| NorESM1-M | | | | | | | | | | |
| NorESM1-ME | Norway | | | | | | | | | |

Horisontaalisten hilapisteiden lukumäärä:



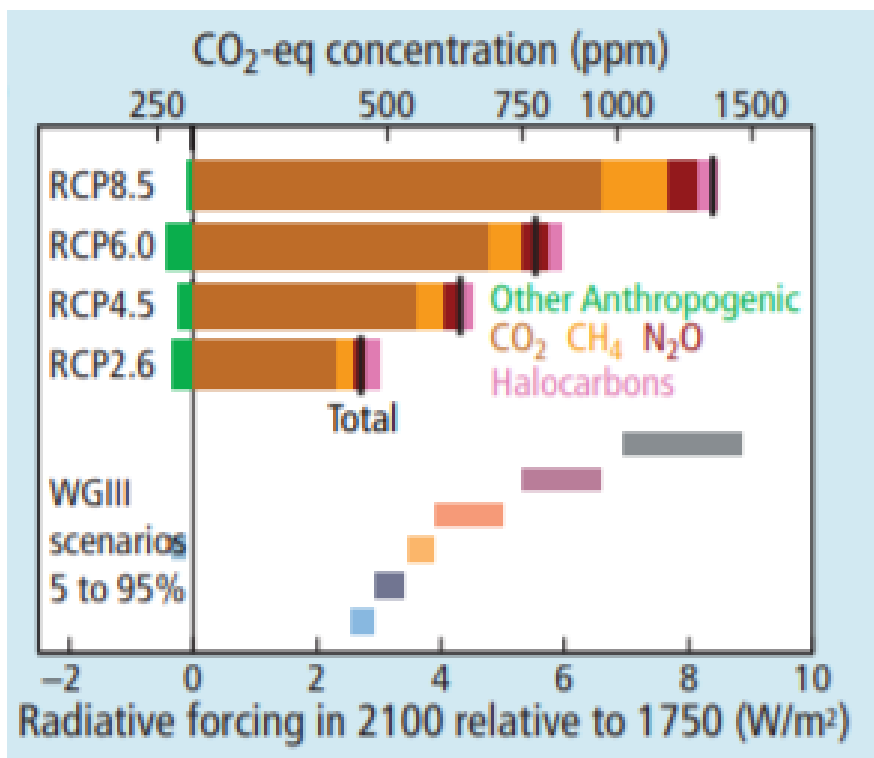
Taulukko 2. (Flato ym. 2013) IPCC:n CMIP5-ilmastomallien pääpiirteet. HT (high-top atmosphere) tarkoittaa, että stratosfääri on täysin mallinnettu. ESM (Earth system model) väritys tarkoittaa, että osassa malleista aerosolien pitoisuudet, ilmakehän kemiaa sekä maa- ja merialueiden hiilen kierto simuloidaan interaktiivisesti. Aerosoleilla vaaleampi väritys tarkoittaa semi-interaktiivista ja tumma täysin interaktiivista. Maanpinnan ja ilmakehän resoluutiot ovat yleensä samat, samoin merijään ja meren.

Menary ja Wood (2018) tutkivat vastaavaa mallijoukkoa suurimpien päästöjen skenaariolla RCP8.5. Myös niihin malleihin, joissa ei tapahtunut merkittävää heikkenemistä subpolaaripyörteen syvänveden muodostuksessa, syntyi pienemmän lämpenemisen alue. Tuo lämpöaukko liittyi AMOCin heikkenemiseen ja madaltumiseen.

Ilmastonmuutosta tutkittaessa käytetään eri päästöskenaarioita. Malleissa käytettyjä päästöskenaarioita on neljä (kuva 18). Ne on rakennettu palvelemaan ilmastomalleja seuraavien periaatteiden mukaan (Van Vuuren ym. 2011).

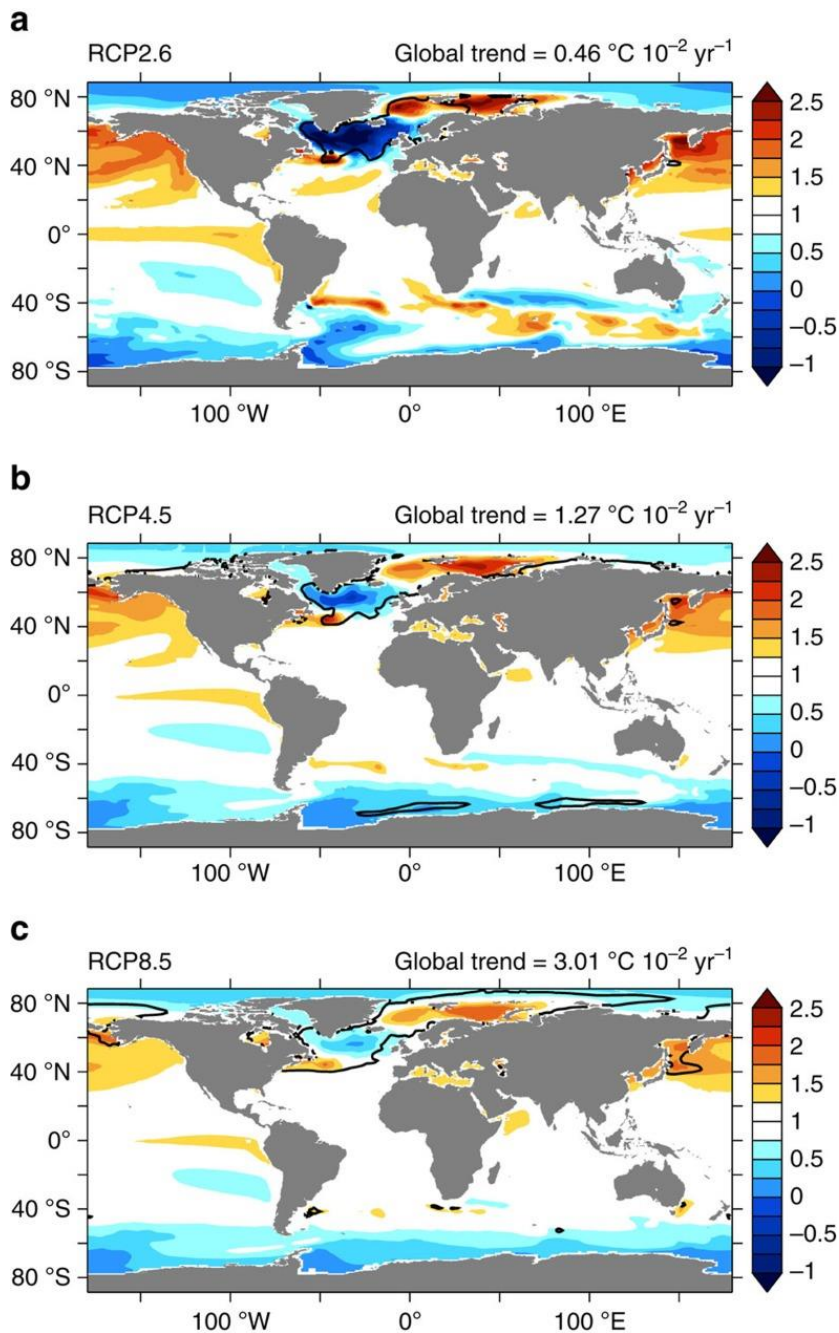
- 1) RCP:n (Representative Concentration Pathways) tulee perustua jo julkaistuihin skenaarioihin ja niiden täytyy pohjautua toisistaan riippumattomien ryhmien työhön. Joukkona RCP:den täytyy edustaa kaikkea kirjallisuudesta löytyvää päästö- ja pitoisuuskehitystä. Lisäksi RCP:n täytyy antaa uskottava ja johdonmukainen kuvaus tulevaisuudesta.
- 2) RCP:n täytyy tarjota tieto kaikista säteilypakotteeseen vaikuttavista elementeistä, joita tarvitaan ilmastomalleihin ja ilmakehän kemialliseen mallinnukseen (kasvihuonekaasupäästöt, ilmansaasteet ja maankäyttö). Tiedon täytyy olla myös maantieteellisesti täsmällisessä ja yhteneväisessä muodossa.
- 3) Eri RCP:llä tulee olla yhdenmukaiset oletukset lähtövuoden päästöistä ja maankäytöstä ja siirtymän historiallisesta analyysistä tulevaisuuteen tulee olla sujuva.
- 4) RCP:n tulee yltää vuoteen 2100 ja tarjota informaatio myös tuleville vuosisadoille.

Ainoastaan RCP8.5-skenaariossa ei ole merkittäviä ilmastopoliittisia toimia mukana, muissa yritetään päästä eri tavoin pienempään ilmastopakotteeseen. RCP2.6-skenaario on ikään kuin paras mahdollinen tulevaisuus, joka alkaa näyttää yhä epätodennäköisemmältä. Sillä päästäisiin todennäköisesti alle 2 asteen globaaliin lämpenemiseen ja päästöt kääntyisivät negatiivisiksi v. 2100 mennessä. Tässä käsitellään RCP2.6-skenaariota, koska suurimmassa osassa subpolaaripyörteen romahdusmalleista ilmiö esiintyy jo RCP2.6-skenaariolla (taulukko 3). Tällä tavalla saadaan myös pidettyä muut ilmastomuutoksen vaikutukset pienempinä, niin että pyörteen romahduksen seuraukset erottuvat paremmin.



Kuva 18 (IPCC 2014) Säteilypakote, joka vastaa kutakin RCP-ryhmää. Alla olevissa väripalkeissa näkyy, kuinka kirjallisuudesta löytyvät päästöskenaariot jakautuvat eri säteilypakoteluokkiin.

Kaikki päästöskenaariot johtavat meren pintalämpötilan nousuun globaalisti. Vastaava 40 ilmastomallin keskimääräinen merenpinnan lämpötilan nousu vuosisadassa on 0.46 °C RCP2.6-, 1.27 °C RCP4.5- ja 3.01 °C RCP8.5-skenaariolle (Sgubin ym. 2017). Lämpötilan nousu ei kuitenkaan jakaudu tasaisesti (kuva 19). Alimmalla eli RCP2.6-skenaariolla kuvassa 19a SPG-alue on suhteessa kylmin verrattuna muuhun Pohjois-Atlanttiin. Tämä tukee valittua keskittymistä skenaarioon RCP2.6, kun tutkitaan SPG:n romahduksen vaikutuksia ilmastoon. Suurimmat erot keskiarvoihin löytyvät pohjoisilta merialueilta ja eritoten Pohjois-Atlantilta muissakin skenaarioissa, ja tällä alueella myös erot mallien välillä ovat suurimmat. Tämä vaikeuttaa SPG-romahduksen aiheuttaman muutoksen erottumista muista ilmastomuutoksen seurauksista.



Kuva 19 (Sgubin ym. 2017) Mallien keskimääräinen meren pintalämpötilan muutos tällä vuosisadalla. Muutos on normalisoitu kunkin skenaarion keskimääräisellä muutoksella siten, että arvot >1 edustavat voimistunutta lämpenemistä, arvot <1 heikentyntä lämpenemistä ja arvot <0 kylmenemistä. Kunkin kuvan yllä on skenaarion nimi ja vastaava keskimääräinen lämpötilan muutos. Mustat käyrät rajaavat alueita, joilla pintalämpötilan muutoksen hajonta on suurin.

5.2. SPG-romahdusta kuvaavien mallien valinta

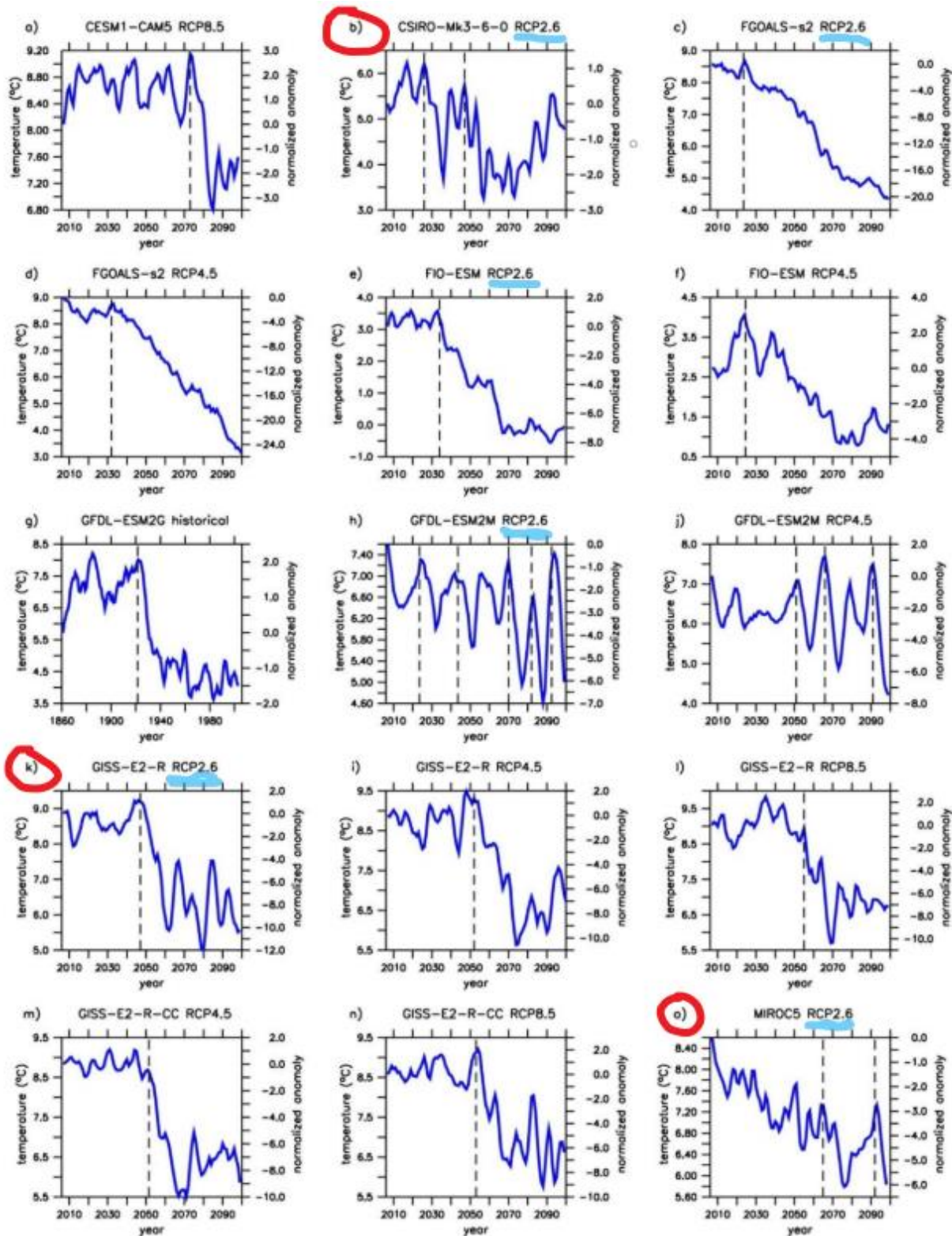
Sgubin ym. (2017) tutkivat, kuinka realistisesti ilmastomallit pystyvät kuvaamaan subpolaaripyörteen sekoittuneen kerroksen syvyyttä, ja kuinka suuressa osassa näitä malleja tapahtui subpolaaripyörteen äkillinen heikkeneminen. Neljästäkymmenestä mallista yhdeksässä tapahtui subpolaaripyörteen äkillinen heikkeneminen ja kahdessa näistä yhdeksästä koko termohaliinisen kiertoliikkeen romahdus. Sgubin ym. (2017) jakoivat mallit kolmeen ryhmään: (1) mallit, joissa ei tapahdu äkillistä muutosta, (2) mallit, joissa subpolaaripyörteen konvektio romahtaa ja (3) mallit, joissa koko termohaliininen kiertoliike Atlantilla heikkenee rajusti (taulukko 3). Tässä äkilliseksi on määritelty tilanne, jossa lämpötila laskee kymmenessä vuodessa kolme kertaa niin paljon, kuin mallin vuosittainen keskihajonta oli ennen teollistumista.

| Table 1 Classification of CMIP5 models in the three sub-ensembles. | | | | |
|--|---|------------|--------------------|-------------------|
| Subset name | List of models | | | |
| Non-abrupt | ACCESS1-0; ACCESS1-3; bcc-csm1-1, bcc-csm1-1-m; BNU-ESM; CanESM2; CCSM4; CESM1-BGC; CESM1-CAM5-1-FV2; CMCC-CESM; CMCC-CM; CMCC-CMS; CNRM-CM; EC-EARTH; FGOALS-g2; GFDL-CM3; GISS-E2-H; GISS-E2-H-CC; HadGEM2-AO; HadGEM2-CC; HadGEM2-ES; IPSL-CM5A-LR; IPSL-CM5A-MR; IPSL-CM5B-LR; MIROC-ESM; MIROC-ESM-CHEM; MPI-ESM-LR; MPI-ESM-MR; MRI-CGCM3; Nor-ESM1-M; NorESM1-ME | | | |
| | Model | Scenario | Year of occurrence | Δ GMT (°C) |
| SPG convection collapse | CESM1-CAM5 | RCP8.5 | ~ 2075 | 3.8 |
| | CSIRO-Mk3-6-0 | RCP2.6 | ~ 2025 | 1.6 |
| | GFDL-ESM2G | Historical | ~ 1920 | 0.2 |
| | GFDL-ESM2M | RCP2.6 | ~ 2025 | 1.1 |
| | | RCP4.5 | ~ 2050 | 1.9 |
| | GISS-E2-R | RCP2.6 | ~ 2050 | 1.4 |
| | | RCP4.5 | ~ 2050 | 1.6 |
| | | RCP8.5 | ~ 2055 | 1.9 |
| | GISS-E2-R-CC | RCP4.5 | ~ 2050 | 1.7 |
| | | RCP8.5 | ~ 2050 | 2.0 |
| AMOC disruption | MIROC5 | RCP2.6 | ~ 2065 | 1.4 |
| | FGOALS-s2 | RCP2.6 | ~ 2025 | 2.2 |
| | | RCP4.5 | ~ 2030 | 2.5 |
| | FIO-ESM | RCP2.6 | ~ 2035 | 1.4 |
| | | RCP4.5 | ~ 2025 | 1.6 |

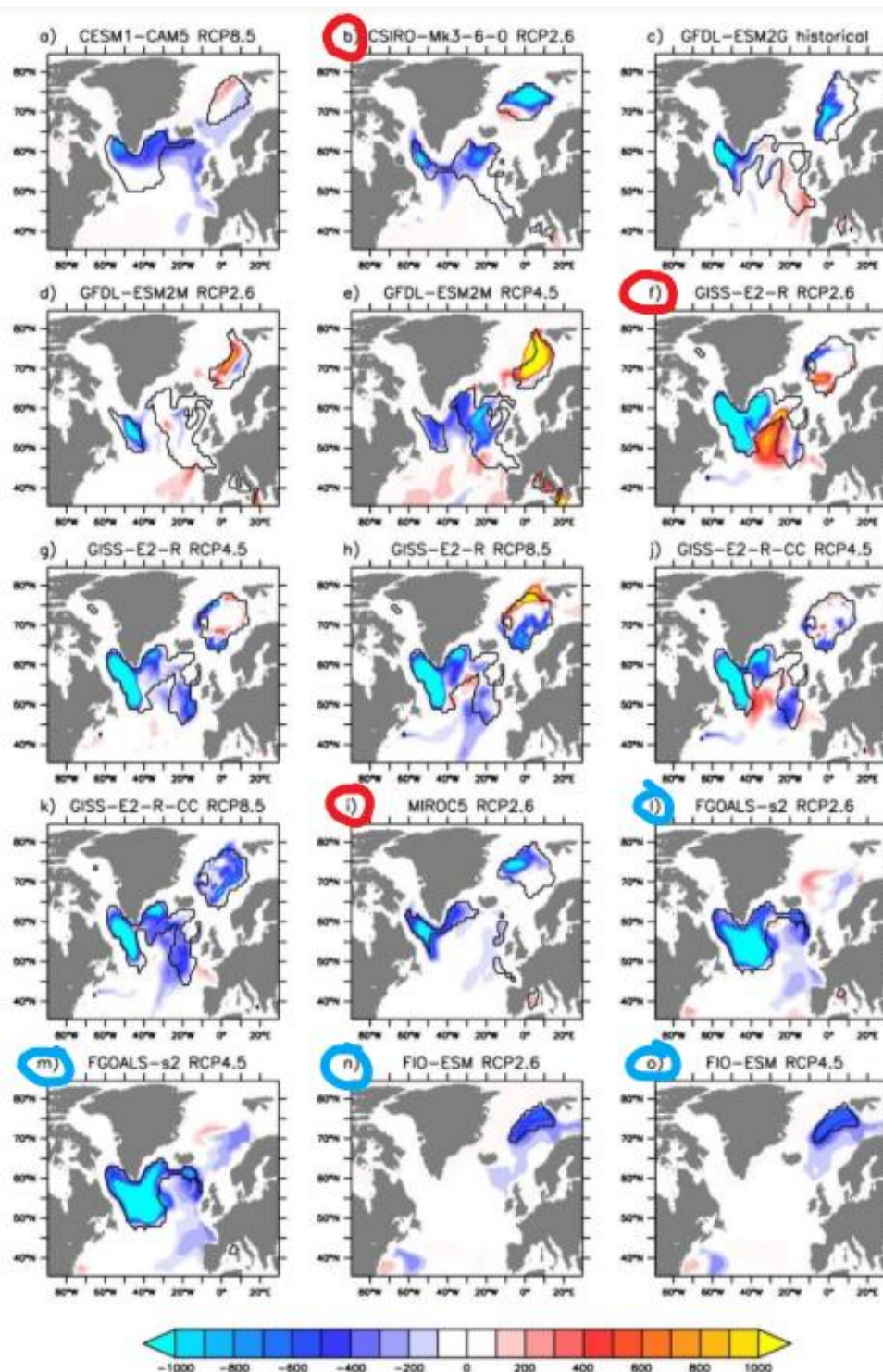
Taulukko 3 Sgubin ym. (2017) käyttämät mallit jaettuna kolmeen ryhmään. Ensimmäisessä ryhmässä ovat mallit, joissa ei tapahdu äkillistä muutosta subpolaaripyörteen alueella. Toisessa ryhmässä ovat pyörteen romahtamisen ja kolmannessa termohaliinisen kiertoliikkeen häiriintymisen mallit. Kahdelle viimeiselle ryhmälle on annettu myös skenaario, jossa ilmiö tapahtuu, esiintymisvuosi ja tilanteeseen liittyvä globaalin lämpötilan nousu verrattuna aikaan ennen teollistumista. Punaisella on reunustettu mallit, joita käytettiin arvioitaessa SPG-romahduksen vaikutuksia ilmastoon.

SPG:n äkilliseen kylmenemiseen liittyviä malliajoja on niin vähän, että niitä kannattaa tarkastella tarkemmin yksittäin. Kuvassa 20 näkyvät SPG:n äkillisiin kylmenemisiin liittyvät meriveden

pintalämpötilan kehitykset. Keskityin skenaarioon RCP2.6 (merkitty kuvaan sinisellä), koska siinä kasvihuonekaasujen lisääntymisen aiheuttaman ilmaston lämpenemisen vaikutukset sotkevat vähiten SPG:n jäähtymisen näkymistä. Näitä malleja on vielä kuusi. Lisäksi poistin mallit, joissa koko AMOC heikkenee tai romahtaa sen vuoksi, että syvän veden muodostusalueita on vain yksi (kuva 21) eli FGOALS-S2 ja FIO-ESM. Viimeisenä kuvan 20 malleista jouduin poistamaan GFDL-ESM2M, koska siinä SPG joutuu voimakkaasti heilahtelevaan tilaan. Siinä mallissa vuosisadassa esiintyy 6 äkillistä SPG:n jäähtymistä ja näin ollen vertailu ennen ja jälkeen äkillisen jäähtymistapahtuman ei ole mielekäästä. Jäljelle jäävät mallien CSIRO, GISS-E2-R ja MIROC5 RCP2.6-ajot. Myös CSIRO- ja MIROC5-malleilla on kaksi äkilliseksi luokiteltua jäähtymistapausta. Niistä huolimatta vuosisadan loppupuoli on selvästi kylmempi kuin alku. Vertailuryhmänä tarkasteltaessa SPG:n romahduksen vaikutusta ilmastoon oli 23 muuta CMIP5-mallia, joissa ei tapahtunut ainakaan selvää subpolaaripyörteen jäähtymistä eikä suhteettoman voimakasta AMOC:in heikkenemistä. Valittujen mallien valintaa puoltaa myös Belluccin ym. (2017) tekemä tutkimus, jossa tarkasteltiin kuinka CMIP5-mallit kuvaavat 1970-luvun kylmää anomaliaa. CSIRO ja MIROC5 kuuluivat viiteen parhaaseen kolmestatoista 1970-luvun kylmenemistä ja sen jälkeistä lämpenemistä kuvaavasta mallista. GISS-E2-R kuului väliryhmään, joka sai kylmenemisen kiinni, mutta lievempänä kuin todellisuus.



Kuva 20 Äkilliset jäähtymiset subpolaaripuörteessä (Sgubin ym. 2017). Meren pintalämpötila ajan suhteen malliajoissa, joissa se tapahtuu. Vasemalla akselilla on absoluuttinen pintalämpötila, oikealla normalisoitu lämpötilapoikkeama. Pystyt katkoviivat ovat ajankohdissa, joissa muutos alkaa.

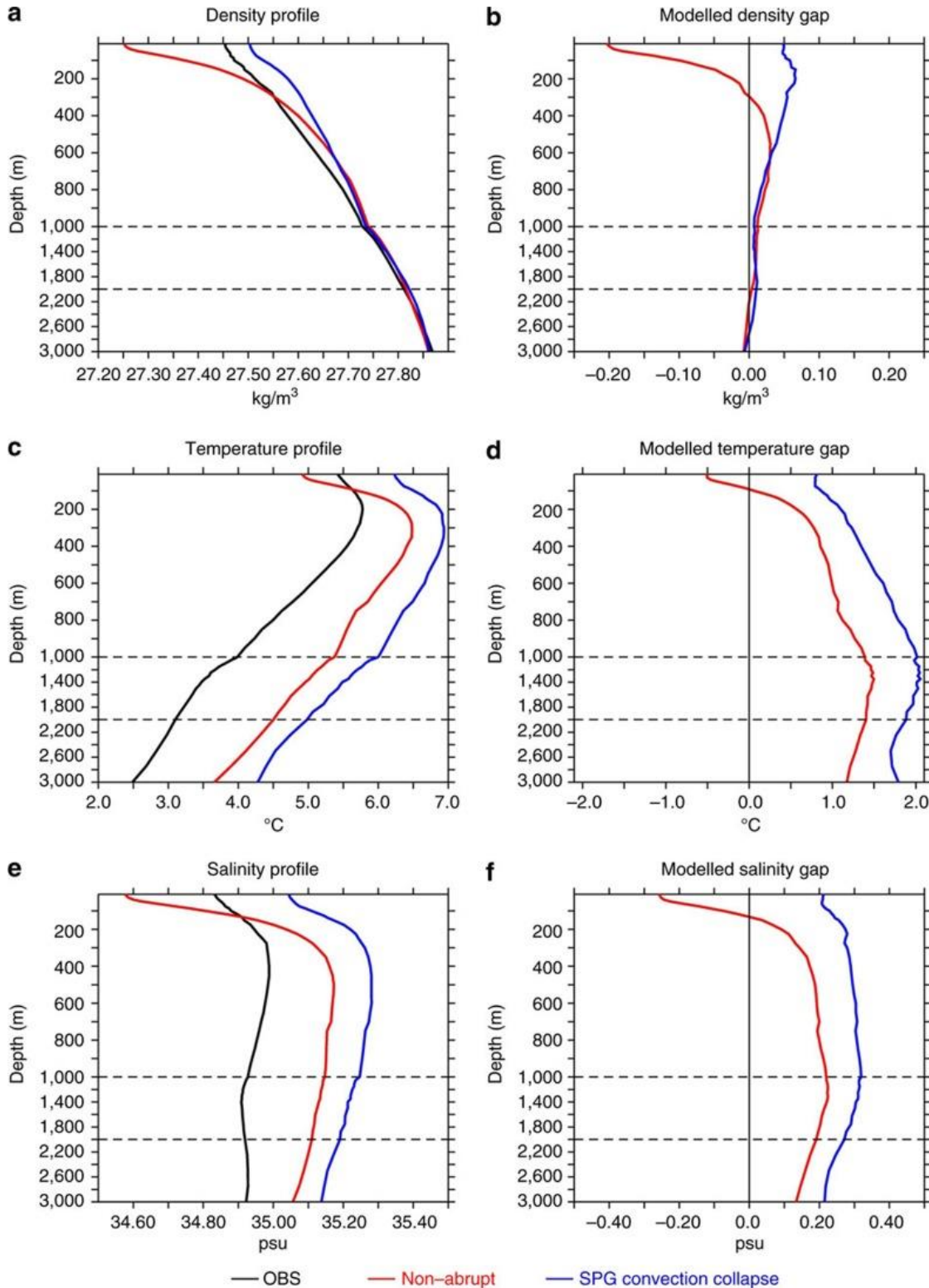


Kuva 21 Sekoitussyvyys ennen kylmenemistä – sekoitussyvyys subpolaaripyörteen muutoksen jälkeen (m) (Squbin ym. 2017). Mustat viivat rajaavat alueita, joilla sekoitussyvyys oli malliajoissa yli 1000 m v. 1986-2015. Kuvakkeet a-i ovat subpolaaripyörteen romahdusmalleista, l-o malleista, joissa koko termohaliininen kiertoliike häiriintyy (merkitty sinisellä). Mallit, jotka valittiin tutkittaviksi, on merkitty punaisella.

5.3. Subpolaaripyörteen romahduksen todennäköisyys

CMIP5-mallien kyky kuvata nykyistä syvänveden muodostusta SPG-alueella on kyseenalainen (Sgubin ym. 2017). Edellytys sille, että malli voi kuvata subpolaaripyörteen romahtamista, on kohtalaisen realistinen kuvaus nykyisestä sekoittuneen veden syvyydestä alueella. Jos pyörteen alueella ei alun alkaenkaan ole syvänveden muodostusta, ei se voi myöskään loppua. Sgubin ym. arvioivat mallien luotettavuutta sillä, kuinka hyvin ne kuvaavat veden kerrostuneisuutta subpolaaripyörteen alueella. Malleissa, joissa syvän veden muodostuksen heikkenemistä ei tapahdu, on talvella selvästi liian stabiili pintakerros pyörteen alueella (kuva 22). Syvemmällä lämpötila ja suolaisuusprofiilit ovat tosin ei-romahdus-ryhmässä lähempänä havaintoja, mutta pinnan läheinen kerros on aivan liian kevyt. Tämä johtaa siihen, ettei suuressa osassa tätä malliryhmää ole tarpeeksi syvän veden muodostusta SPG-alueella, joka voisi romahtaa.

Nykyisin käytössä olevat ilmastomallit näyttävät siis aliarvioivan subpolaaripyörteen romahduksen todennäköisyyttä. Jos huomioidaan kaikki 40 mallia, subpolaaripyörteen romahduksen todennäköisyys on 17.5%, eli romahdus tapahtuu seitsemässä mallissa neljästäkymmenestä. Jos lähdetään rajaamaan käytettävien mallien lukumäärää sen mukaan, kuinka hyvin ne kuvaavat veden kerrostuneisuutta pyörteessä, todennäköisyys nousee dramaattisesti. Parhaasta 18 mallista jo 6 saa aikaan subpolaaripyörteen romahduksen vuosisadan loppuun mennessä. Lisäksi näissä 12 mallissa, joissa romahdusta ei tapahdu, pyörteen alueen pintavesi on liian lämmintä 6.9 °C ja suolaista 35.1 psu (luvut ovat mallien keskiarvoja). Havaintoihin perustuvat arvot ovat 5.4 °C ja 34.8 psu. Subpolaaripyörteen romahtamista kuvaavat mallit ovat lähimpänä tätä 5.9 °C ja 35.0 psu. Näin pieni määrä malleja, joissa nykyinen tilanne on oikein kuvattu, heikentää todennäköisyysarvion uskottavuutta. Voisi sanoa, että sopivat kriteerit määrittämällä ja niiden avulla malleja rajaamalla päästäisiin jo siihen, että SPG-romahdus on todennäköinen tämän vuosisadan aikana.



Kuva 22 Subpolaaripyörteen kerrostuneisuus talvella nykyisin (Sgubin ym. 2017). Musta käyrä on havainto, punainen keskiarvo malleista, joissa ei tapahdu äkillistä muutosta ja sininen käyrä keskiarvo malleista, joissa pyörre romahtaa. Vasemmat kuvat: (a) tiheys (kg/m^3), (c) lämpötila ($^{\circ}\text{C}$) ja (e) suolaisuus (psu) Oikeanpuoleisissa kuvissa ovat vastaavien mallisimulaatioiden erot havaintoihin (pystyviiva 0-kohdalla). Vaakasuorat katkoviivat ovat 1000 m ja 2000 m syvyydessä. Pystyasteikon mittakaava muuttuu 1000 m kohdalla.

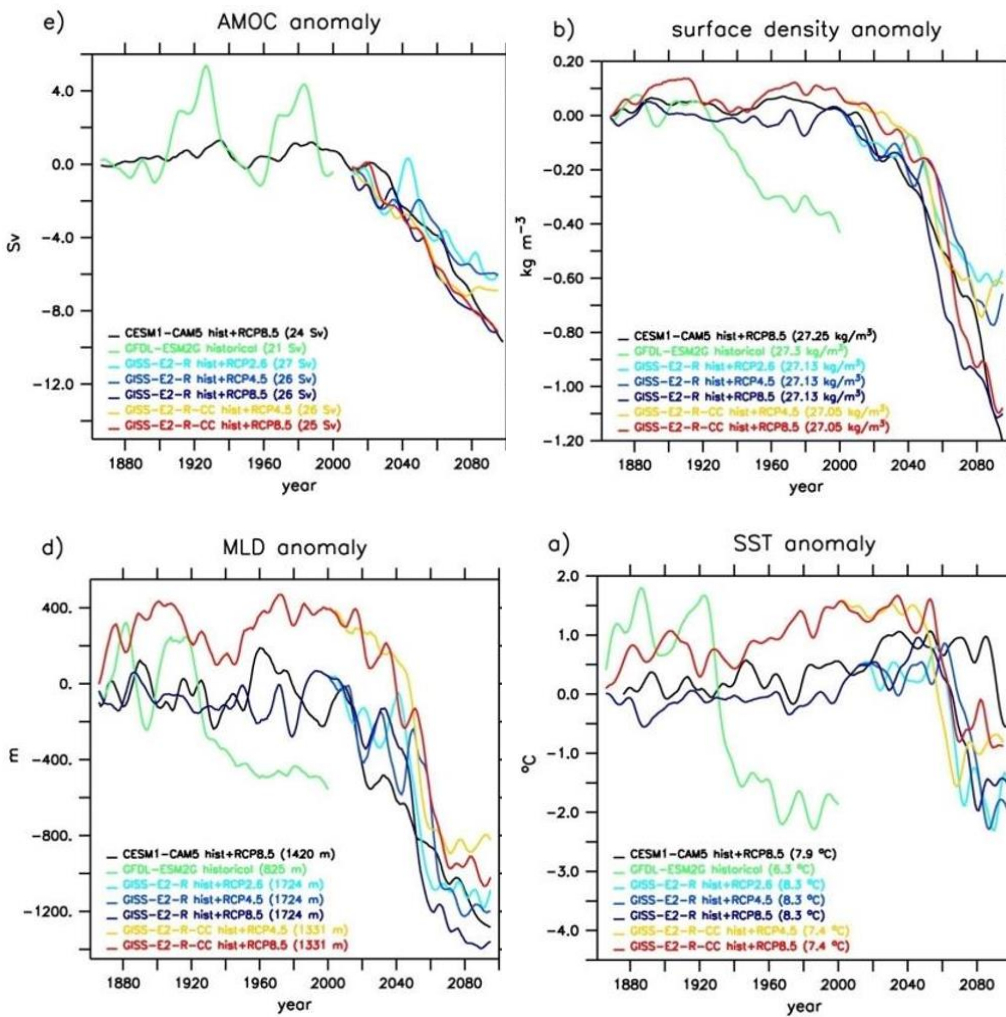
Malleja, joissa subpolaaripyörteen lämpötila romahtaa on niin vähän, että niitä kannattaa tarkastella yksilöllisesti. Kuvassa 20 näkyy kaikki malliajoissa tapahtuvat subpolaaripyörteen romahdukset. Lasketaan yhden mallin eri versiot, kuten GISS-E2-R ja GISS-E2-R-CC yhdeksi malliksi. Jos yhden mallin eri skenaarioissa tapahtuvat romahdukset lasketaan vain yhdeksi, ja joukosta lisäksi poistetaan koko AMOCin häiriintymistä kuvaavat FGOALS ja FIO, jää vertailtavaksi vain viisi toisistaan täysin riippumatonta tapausta. Silloin on suunnilleen yhtä yleistä, että tapahtuu useampi äkillinen jäähtyminen subpolaaripyörteen alueella kuin pelkästään yksi romahdus. Esimerkiksi GISS-E2-R-mallista on kuvassa kolme eri skenaariota ja kaksi mallin versiota. Toinen puhtaasti romahdusta kuvaava tilanne on CESM1-CAM5 mallin RCP8.5-ajo. CSIRO ja MIROC5 ovat kahdella romahduksellaan vähän välimuotoja, mutta GFDL-ESM2M-malli on selvästi monen SPG-romahduksen malli.

Näyttää, että SPG-romahdus on pienestä kiinni ja lisää ilmastosysteemin kaoottisuutta. Tätä tulkintaa tukee edellä kuvatut monen SPG-romahduksen malliajot. Lisäksi ainoastaan GISS-E2-R-mallissa romahdus tapahtuu kaikilla skenaarioilla. Muilla malleilla romahdus tapahtuu joillain skenaarioilla ja joillain ei. Lisäksi GFDL-ESM2G-mallissa romahdus tapahtuu jo historiallisessa ajossa 1920-luvulla.

Ilmastomalleissa ei huomioida Grönlannin sulamisesta tulevaa makean veden lisäämistä. Tämä lisää subpolaaripyörteen romahtamisen mahdollisuutta. Makean veden ja Grönlannista irtoavien jäävuorien kasaantuminen subpolaaripyörteeseen tekee vedestä kevyempää ja heikentää syvän veden muodostusta. Myös tästä syystä CMIP5-ilmastomallit voivat aliarvioida subpolaaripyörteen romahduksen todennäköisyyttä. Vuoden 1993 jälkeen Grönlannista on tullut 5000 *km*² makeaa vettä subpolaariselle Pohjois-Atlantille. Se vastaa puolta 1970-luvun suuresta suolaisuusanomaliasta (Dukhovskoy ym. 2019). Makeasta vedestä 44% on jäänyt tuolle alueelle, mutta sekoittunut ylimpään 500 metriin. Tämän jäätiköiden sulamisen jättäminen pois antaa osittain epärealistisen kuvan SPG:n meriveden tiheyden kehityksestä tulevaisuudessa.

6. Äkillisen kylmenemisen eteneminen SPG-romahdus-malleissa.

Subpolaaripyörteen sekoitusvyvyys, AMOC ja NAO ovat tiiviisti kytköksissä toisiinsa. Sen vuoksi romahduksen perimmäisen syyn päättelyminen on vaikeaa. Eri malleissa tapahtumat voivat myös edetä hiukan eri tavalla. Kuvassa 23 näkyy SPG-romahdusmallien AMOCin, SPG:n sekoitusvyvyyden, pintatiheyden ja merenpinnan lämpötilan kehitys. Tapahtumaketju SPG-romahduksen yhteydessä voisi kulkea esimerkiksi näin. Tämä on hiukan muutettu versio Sgubinin ym. (2017) lisämateriaalissa esittämästä tapahtumien kuvittelusta kulusta.



Kuva 23 (Sgubin ym. 2017) SPG-romahdusmallien AMOCin kehitys ja SPG-alueen pintatiheyden, sekoitusvyvyyden ja merenpinnan lämpötilan kehitys.

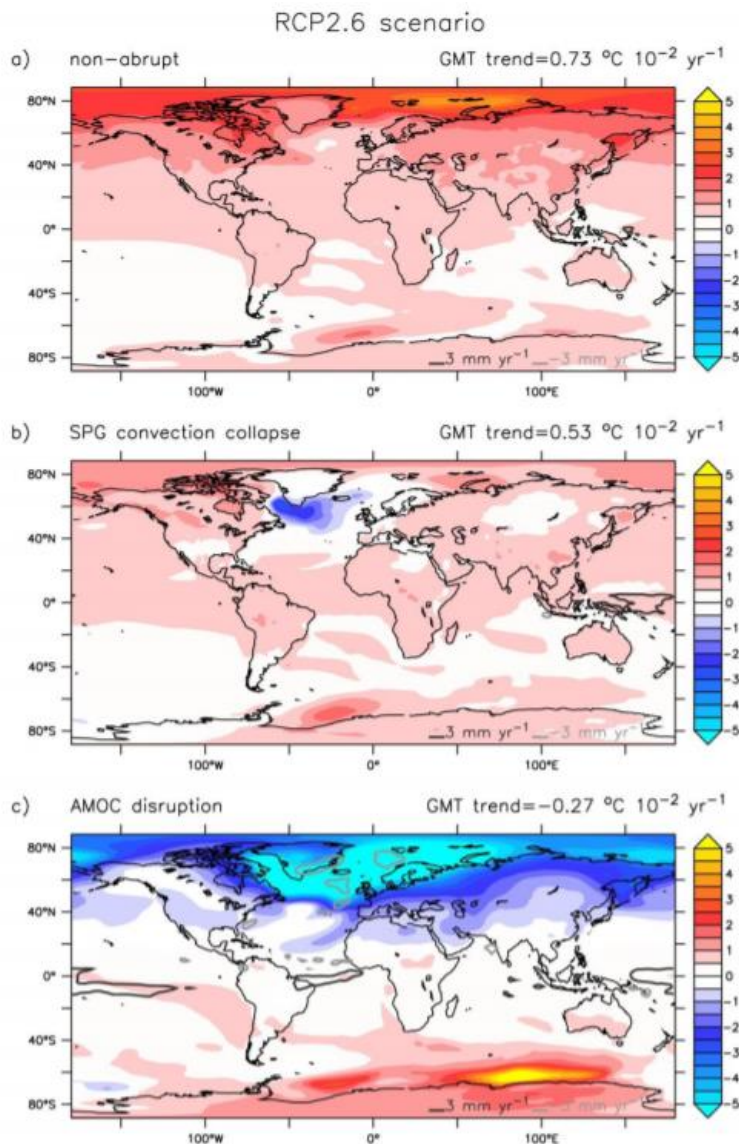
Ennen romahduksen tapahtumista mallien AMOC on jo heikentynyt hieman, ja pintatiheys on kääntynyt pieneen laskuun (kuva 23). AMOCin heikkenemisen takia SPG-alueelle virtaa suolattomampaa vettä. Myös koko Arktisen alueen ennustettu muuttuminen suolattommaksi ja lämpimämmäksi ilmastomuutoksen seurauksena vaikuttaa pintatiheyden pienenemiseen SPG-

alueella. SPG:n pintakerroksen muuttuminen kevyemmäksi johtaa sekoitusvyvyyden pienenemiseen. Sekoitussyvyyden pieneneminen tapahtuu useammassa vaiheessa, mikä voi viitata satunnaiseen vuorovaikutukseen NAO:n kanssa. Voimakas positiivinen NAO yrittää käynnistää konvektion uudestaan, mutta se konvektio yltää kuitenkin kerta toisensa jälkeen ohuempaan kerrokseen. Vähemmän tiheä vesimassa SPG:n keskellä pienentää tiheyseroa ympäröivään kevyempään veteen. Tämä heikentää syklonaalista virtausta SPG:ssä, jolloin yhä vähemmän subtrooppista suolaista vettä virtaa alueelle. Lopulta koko SPG:n sekoitusvyvyys, suolaisuus ja pintalämpötila romahtavat, kun pintakerros on kytkeytynyt irti syvemmästä vedestä.

7. Subpolaaripyörteen muutosten vaikutus ilmastoon tulevaisuudessa

7.1. Pääpiirteet

Subpolaaripyörteen romahdus pienentäisi globaalia ilmastomuutoksen aiheuttamaa lämpötilan nousua (kuvat 24a-b). Osassa SPG:tä voisi tapahtua jopa absoluuttista keskilämpötilan laskua skenaariolla RCP2.6. Vaikka AMOCin täysi pysähtyminen ei vaikutakaan niin todennäköiseltä kuin SPG:n pysähtyminen, sen vaikutukset olisivat aivan eri luokkaa. Koko arktisella alueella ja Suuressa osassa Pohjois-Atlanttia keskilämpötila voisi romahtaa jopa 5 astetta (kuva 24c). AMOCin romahtamisen simuloivissa malleissa tämä tapahtuisi jo lievimmällä RCP2.6-skenaariolla.



Kuva 24 (Sgubin ym. 2017) Ilman pintalämpötilan trendi °C v. 2000-2099 eri malliryhmille ja skenaariolle RCP2.6. Vastaavat globaalin keskilämpötilan (GMT) trendit ovat oikeassa yläkulmassa. Harmaat käyrät rajaavat alueet, joilla vuoden sademäärä pienenee yli 300 mm vuosisadassa.

Maailman meret ottavat tällä hetkellä ilmakehästä noin 25–30% ihmisen tuottamasta hiilidioksidista ja Pohjois-Atlanti on tässä tärkeä tekijä. Subpolaaripyörre on syvänveden muodostuksen takia pääasiallinen Pohjois-Atlantin alue, jossa hiilidioksidi siirtyy ilmakehästä mereen (Li ym. 2016). Näin subpolaaripyörteen äkillisellä heikkenemisellä voi olla merkitystä koko ilmakehän hiilitaseeseen. Vaikutuksen suuruutta on kuitenkin vaikea arvioida, koska subpolaaripyörteen romahtaminen voi voimistaa konvektiota ja hiilen sidontaa muilla alueilla.

Subpolaaripyörteen äkillinen heikkeneminen voi heikentää koko AMOC:ia. Jos syvänveden muodostus estetään ilmastomallissa Pohjois-Atlantilla, sitä alkaa syntyä muualla (Jackson ym. 2017). Pelkän subpolaaripyörteen syvän veden muodostumisen sammuminen siis voi lisätä konvektiota Grönlanninmerellä ja muilla arktisilla merialueilla. Tämä näkyy myös osassa ilmastomalleja (kuva 21). Subpolaaripyörteen sammuminen ei siis välttämättä tarkoita koko AMOCin sammumista, vaikka onkin edellytys tälle tapahtumalle. Menaryn ja Woodin (2018) mukaan kaikkien CMIP5-mallien keskimääräinen viive sekoitusyvyyden pienenemisestä termohaliinisen kiertoliikkeen heikkenemiseen on noin viisi vuotta. Toiset viisi vuotta malleissa menee lämpenemisaikon syntymiseen Pohjois-Atlantille. Tässä on kyseessä eri mekanismi kuin subpolaaripyörteen äkillisessä romahtamisessa, joka aiheuttaa lähes samanaikaisen kylmenemisen pyörteen alueella. Vähitellen tapahtuva AMOCin heikkeneminen ja siitä syntyvä pienemmän lämpenemisen alue Atlantille on siis selvästi heikompi, syntyy hitaammin ja vasta suurempien päästöjen skenaarioilla kuin SPG:n romahtaminen (Menary ja Wood 2018).

AMOCin heikkenemisen pitäisi pienentää meren lämmönkuljetusta arktisille alueille. Näin ei kuitenkaan välttämättä käy ilmaston muuttuessa. Oldenburg ym. (2018) tutkivat lämmönkuljetusta arktiselle alueelle CO₂-pitoisuuden nopeasti nelinkertaistuessa. Nummelin ym. (2017) tutkivat vastaavaa asiaa RCP8.5-skenaariolla. Molemmissa tutkimuksissa todettiin lisääntyvää lämmönkuljetusta arktiselle alueelle ja pienentyvää lämmön konvergenssia SPG:hen. Tämä olisi aivan looginen mahdollisuus SPG-romahduksen yhteydessäkin, vaikka nyt käytetty RCP2.6-skenaario onkin huomattavan heikko näihin kokeisiin verrattuna.

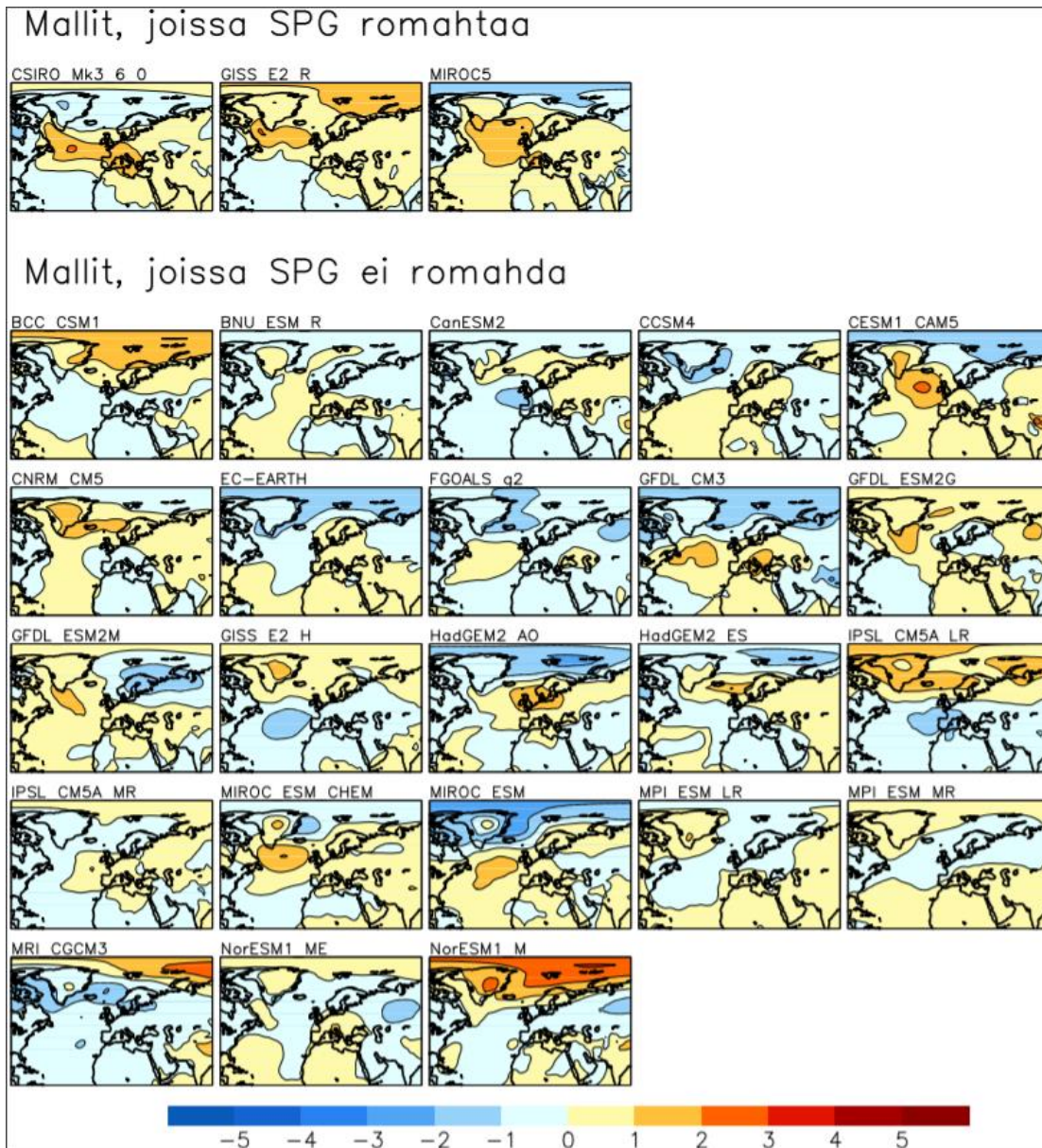
Subpolaaripyörteen heikkenemisen voidaan olettaa vaikuttavan Euroopan ilmastoon ilmakehän kiertoliikkeen muutosten kautta. Talvisen konvektion loppumisesta johtuva kylmeneminen alueella voisi heikentää kylmän Grönlannin ja lämpimän meren välistä lämpötilagradienttia. Matalapainetoiminta alueella heikkenisi ja NAO-indeksi muuttuu negatiivisemmaksi. Voimakkaan

Islannin matalan aiheuttama lauha lounaisvirtaus ja sadealueiden mukanaan tuoma lämpö ja kosteus eivät siis vaikuttaisi niin usein pyörteen romahdettua. Pohjois-Atlantille voisi syntyä useammin jopa blocking-tyyppinen korkeapaine, joka estää merellisen ilman virtauksen Eurooppaan. Häkkinen ym. (2011) osoittivat, että menneisyydessä heikon SPG:n tilanteeseen on liittynyt tavallista useammin blocking-tilanteita Grönlannista Britteinsaarille ulottuvalla alueella. Suoraa syy ja seuraus suhdetta SPG:n ja ilmakehän vuorovaikutuksille ei ole löydetty. SPG:n vaikutus ilmakehän virtaukseen on yhä epävarmalla pohjalla.

7.2. Tulokset

Työn ohjaaja Jouni Räisänen laski SPG-romahdusmallien ja 23 vertailumallin simuloimat muutokset vuosien 2000-2099 lineaarisena trendinä lämpötilalle, merenpintapaineelle ja sademäärälle RCP2.6-skenaariossa (kuvat 26, 27 ja 28). Malliryhmien muutosten erotuksessa rasteroidulla alueella ero on kaksipuolisen *t*-testin mukaan 5% tasolla merkitsevä. On siis 5% mahdollisuus, että rasteroidulla alueella malliryhmien väliset erot olisivat sattumaa. Erojen tilastollista merkitsevyyttä laski etenkin vertailuryhmän 23 mallin suuret erot toisiinsa nähden (esimerkkinä tästä merenpintapaineen muutokset kuvassa 25).

Isoin ero malliryhmien välillä löytyy aika luonnollisesti lämpötilasta Labradorinmeren alueelta ja siitä itään (kuva 26). Tämä lämpötilanmuutos näkyy kaikkina vuodenaikoina, mutta voimakkaimmin talvella, kun syvän konvektion lämmittävä vaikutus puuttuu ja merijää leviää kohti Labradorinmerta. Pintapaineessa (kuva 27) erottuu vuodenajoittain vaihteleva hieman korkeamman paineen vyöhyke Labradorinmereltä Länsi-Eurooppaan. Muodoltaan korkeamman paineen alue muistuttaa kuvan 12a pintapaineanomaliala. Isoin poikkeama kuvan 12a ja SPG-ryhmän väliltä löytyy Labradorinmereltä. Häkkinen ym. (2011) yhdistivät tuon anomalian heikentyneeseen SPG:hen. Häkkisen ym. havainnoista eristämä pintapaineen muutos on selvästi suurempi kuin SPG-romahdusryhmään liittyvä. Häkkinen ym. yhdistivät heikentyneeseen SPG:hen myös lisääntyneen blocking-aktiviteetin (kuva 13). Sademäärässä merkittävimmät erot ovat sademäärän väheneminen subpolaaripyörteen alueella ja Yhdysvaltain itärannikolta kohti Norjanmerta ulottuvalla alueella (kuva 28). Välimeren eteläpuoleisen alueen ja etenkin Saharan sademäärästä ei voi vetää mitään johtopäätöksiä, koska pienikin muutos lähes sateettomassa tilassa aiheuttaa erittäin suuren suhteellisen muutoksen.



Kuva 25 Pintapaineen muutos yksittäisissä malleissa 2000-2099. Yksikkönä hPa.

Malliajoissa ei näy vahvoja viitteitä siitä, että polaaripyörteen romahtaminen edesauttaisi koko AMOCin kiertoliikkeen romahtamista. SPG-romahdus-ryhmän korkeampi paine Atlantilla voi tosin olla merkki siitä, että Atlantille syntyy keskimääräistä useammin blocking-tyyppinen korkeapaine. Tämä vaikuttaisi tuulen synnyttämään komponenttiin merivirroissa, jolloin pohjoisille merialueille virtaisi vähemmän lämmintä ja suolaista vettä. Myös SPG-romahdusryhmän pienempi lämpeneminen Grönlannin itäpuolisella alueella viittaa siihen, että lämpimämmän ja suolaisemman veden virtaus alueelle on heikentynyt. CSIRO- ja MIROC5-malleissa näkyy myös voimakas sekoitussyvyyden lasku tällä alueella (kuva 21).

Mallilaskelmista voi tehdä varovaisia päätelmiä SPG-romahduksen vaikutuksista lämpötilan muutoksen arktiseen amplifikaatioon ja merijäähän. Arktisilla merialueilla Grönlannin itäpuolella suurin lämpötilan muutoksen ero ryhmien välillä on talvella 3-5°C. Keväällä ja kesällä ero on pienempi, mutta merkitsevämpi, rasterointi ulottuu Norjan ja Huippuvuorten välille. Talven merkitsevyyden puuttuminen johtuu vertailumallien suuresta hajonnasta alueella. Laskelmat tukevat ennako-odotusta merijään pienenemisen hidastumisesta Arktisilla alueilla tai jopa kääntymisestä kasvuun.

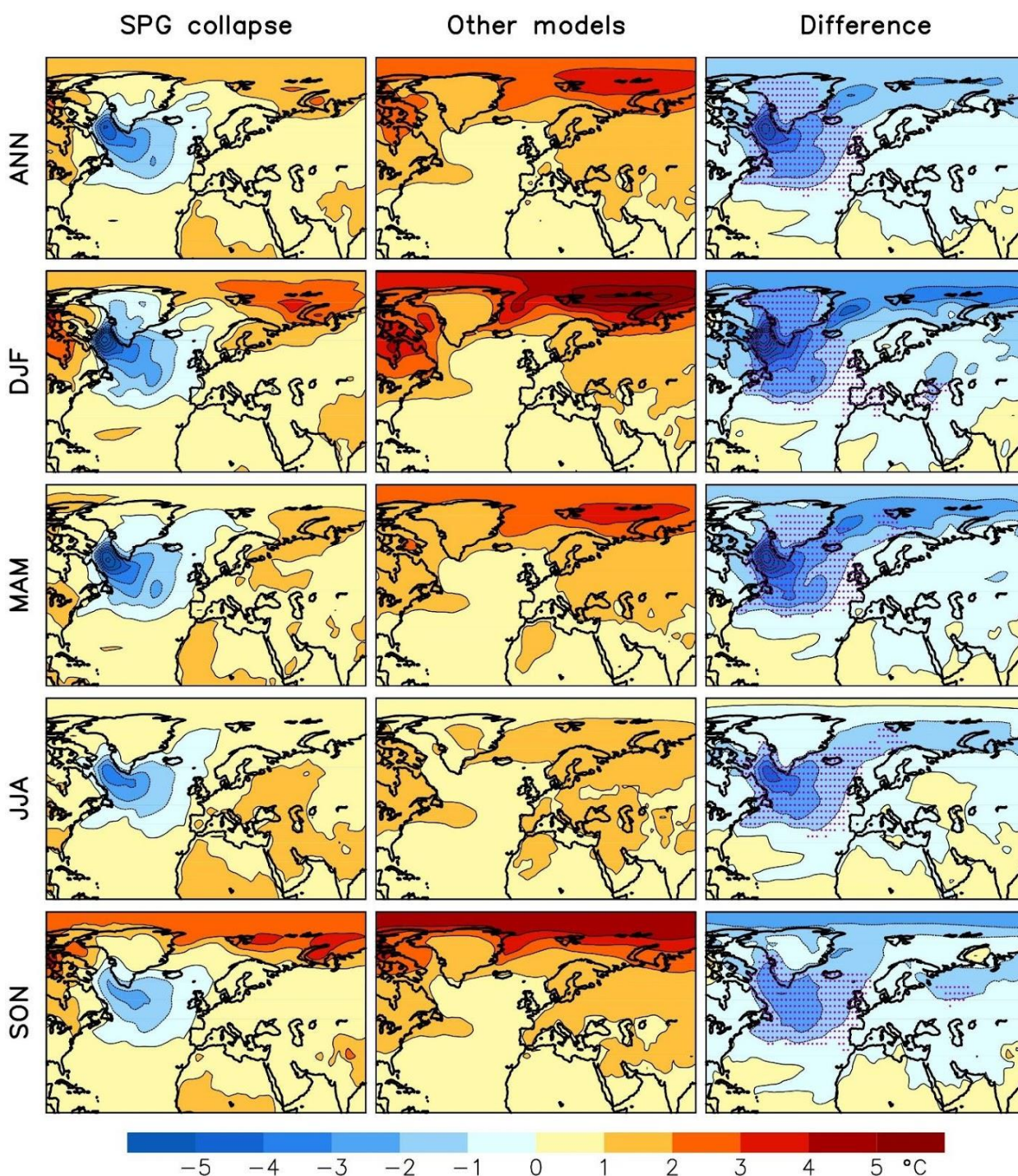
Talvella syntyy isoin lämpötilaero malliryhmien välille Labradorinmerellä. Syvä konvektio on estynyt SPG:n romahdettua, eikä enää lämmitä subpolaaripyörteen aluetta. Merijää pääsee valtaamaan laajemman alan Labradorinmerestä ja suurimmat arvot erotuskentässä on jopa -10°C. Pelkkä jäähtyminen jo aiheuttaa signaalin myös pintapainekenttään Labradorinmeren alueella ja keväällä tuo korkeamman paineen alue ulottuu Kanadan länsiosiin. Pintapainekartassa malliryhmien ero näkyy talvella koko Pohjois-Atlantin alueella. Merkittävimmät poikkeamat ovat Länsi-Euroopassa ja Labradorinmerellä. Tämä tilanne suosii -NAO-tyyppistä virtausta Atlantilla, jossa paine on keskimäärin korkeampi Pohjois-Atlantin alueella ja lauhin lounainen virtaustyyppi estynyt. Sademäärissä Golf-virran seudulla on vähän merkitsevää pienenemistä. Se voi olla merkki koko matalapainetoiminnan heikkenemisestä, tai sen siirtymisestä etelämmäksi. Pienempien sademäärien eteläpuolelta kyllä löytyy alue, jossa sademäärät ovat suurempia SPG-romahdusryhmässä. Ero vertailuryhmän malleihin ei ole kuitenkaan tilastollisesti merkitsevä. Lämpötilassa ja sademäärässä ei kuitenkaan näy paljon mitään eroa malliryhmien välillä Euroopan alueella jouluhelmikuussa. Välimerelle ja Länsi-Eurooppaan ulottuu malliryhmien erotuksessa vähän tilastollisesti merkitsevä viileämmän sään rasterointi. Välimeren maat ovat myös aavistuksen kuivemmat SPG-romahdusryhmässä, mutta merkitsevyyden rasterointi puuttuu lähes kokonaan. Pohjois-Euroopassa ja Venäjällä ei ole merkittävää eroa malliryhmien välillä. Tämä on hiukan omituista, koska SPG-romahduksen pitäisi näkyä nimenomaan pohjoisilla alueilla. Selityksenä voi olla mallien suuri hajonta pohjoisilla alueilla

Kevätkuukausina maaliskuu-toukokuussa kartat näyttävät hyvin samankaltaisilta kuin talvella. Läntiseltä Välimereltä löytyy vähän voimakkaampi kuiva signaali. Pohjois-Atlantia halkova korkeamman paineen alue on heikompi ja merkitsevän alueen rasterointitiplä Atlantilta kadonnut.

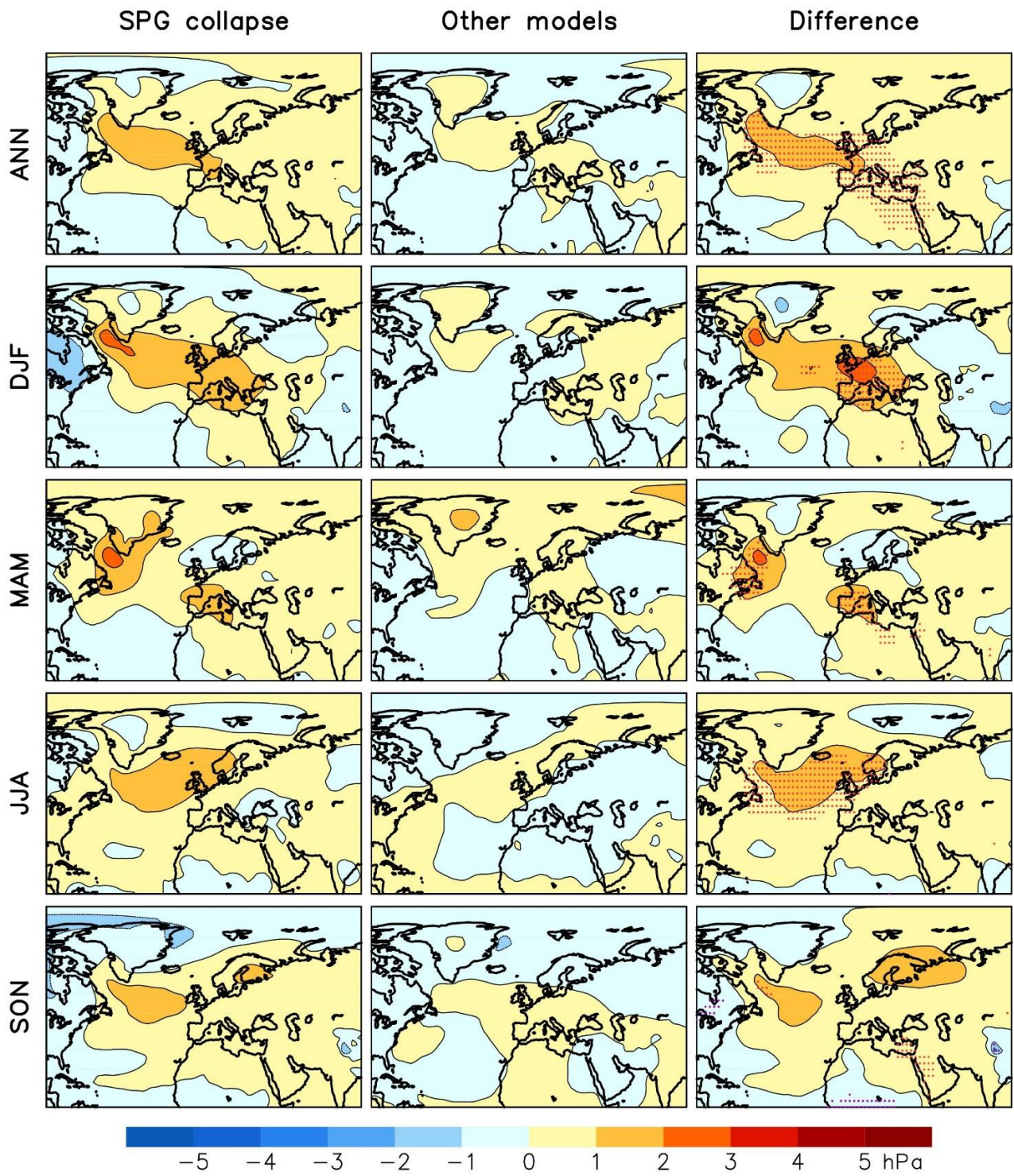
Kesällä (kesä-elokuu) viileämpi alue SPG:n seudulla on heikentynyt selvästi. Yhä isoin ero malliryhmien välillä on kuitenkin 4°C Labradorinmerellä ja 5% tasolla merkitsevän rasteroinnin

alue hipoo Länsi-Eurooppaa. Merenpintapaineessa korkeamman paineen alueet Labradorinmerellä ja Länsi-Euroopassa ovat heikentyneet ja merkitsevemmän korkeapaineen alue kattaa koko Yhdysvaltojen ja Euroopan välisen alueen. Sademäärissä isoin pieneneminen SPG-romahdusryhmässä muihin malleihin verrattuna löytyy vähän katkonaiselta vyöhykkeeltä, joka ulottuu Yhdysvaltain rannikolta Britteinsaarten kautta Skandinaviaan. Vaikuttaa, että SPG-romahdusmalleissa matalapainetoiminta Pohjois-Atlantilla on heikentynyt ja jopa laaja blocking-korkea esiintyy useammin Pohjois-Atlantin alueella.

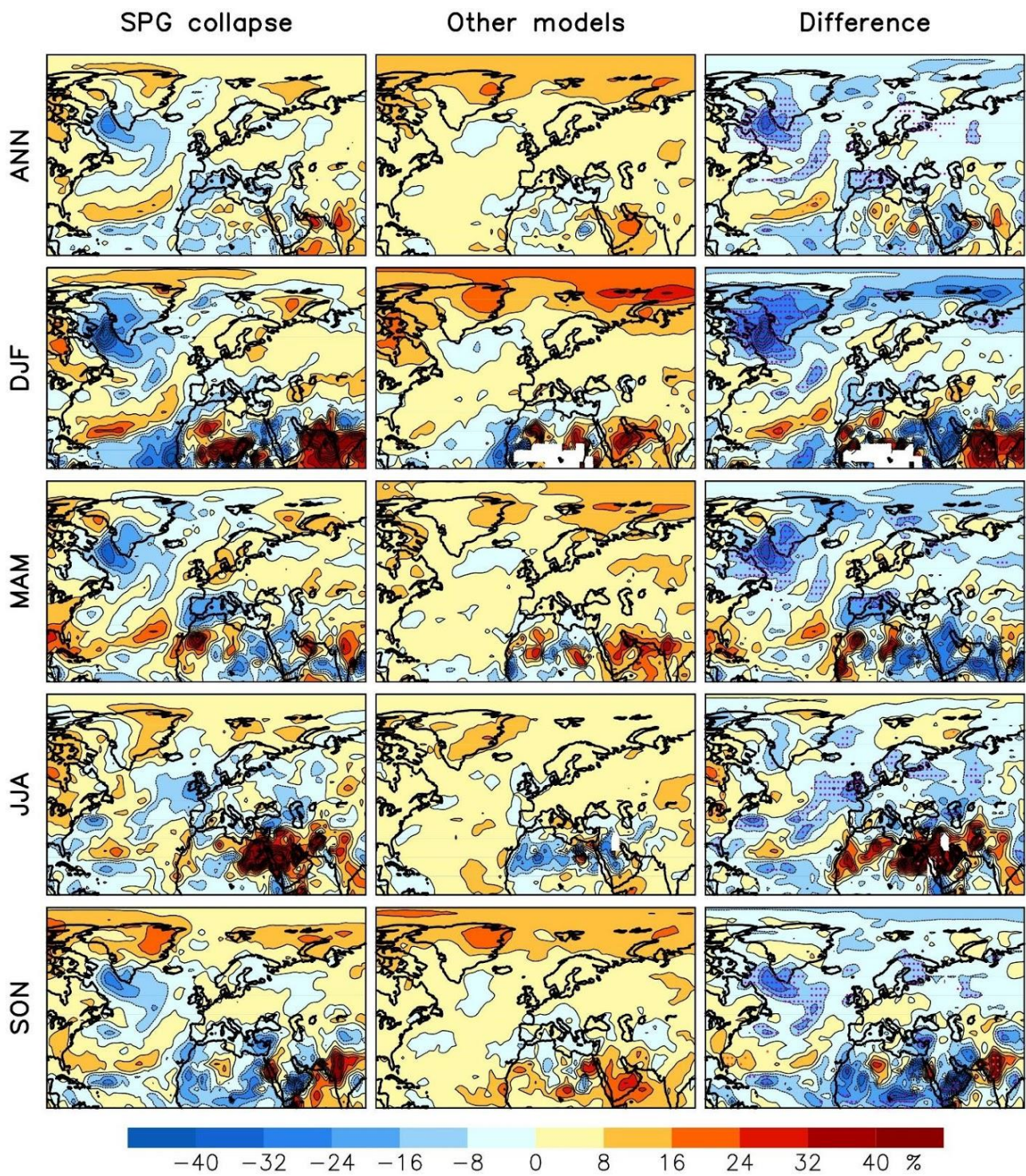
Syksy (syys-lokakuu) on kaikista vuodenaajoista se, jona erot malliryhmien välillä ovat pienimmät. Tämä on loogista, koska malliryhmien erot syntyvät pitkälti kevättalvisin tapahtuvan konvektion puuttumisesta SPG-alueella. Lämpötilaero malliryhmien välillä on yhä samalla alueella Labradorinmerellä ja siitä itään, mutta vuodenaajoista heikoimpana. Kesän korkeamman paineen alue Atlantilta on lähes kadonnut, samoin kuivempi vyöhyke Britteinsaarten ja Skandinavian välillä. Labradorinmerellä erottuu jo kuivempi alue SPG-romahdus-malliryhmässä. Suomen lähettäviltäkin on syksyllä heikko signaali. SPG-ryhmä on kuivempi ja kylmempi 5% merkitsevyystasolla Suomessa tai siitä itään. Korkeampi painekin Suomen seudulta löytyy, mutta se ei ole merkitsevä tuolla 5% tasolla.



Kuva 26. Pintalämpötilan muutokset RCP2.6-skenaarioon perustuvissa CMIP5-simulaatioissa (lineaarinen trendi v. 2000-2099). Ensimmäisellä rivillä on muutosten koko vuoden keskiarvo ja seuraavilla riveillä muutokset eri vuodenaikoina (joulu-helmikuu, maaliskuu-toukokuu, kesä-elokuu ja syys-marraskuu). Vasemmalla on keskiarvo 3:sta mallista, joissa subpolaarinen pyörre romahtaa, keskellä keskiarvo 23:sta muusta mallista ja oikealla näiden erotus. Alueet, joilla ero on kaksipuolisen t-testin mukaan 5% tasolla merkitsevä, on merkitty täplityksellä.



Kuva 27. Kuten kuva 26, mutta merenpintaan redusoidun ilmanpaineen muutoksille



Kuva 28. Kuten kuva 26, mutta sademäärän muutoksille.

8. Yhteenveto

Lukujen 2 ja 3 tarkastelujen pohjalta on ilmeistä, että ainut tapa saada mitään arviota subpolaaripyörteen vuorovaikutuksesta muun kiertoliikkeen kanssa on ilmastomallien käyttö. Suorat havainnot merestä kattavat niin lyhyen ajan, että jo menneisyydenkin arvioimiseen tarvitaan mallinnusta.

Luvussa 4 tarkasteltiin menneiden vuosikymmenien SPG:n kiertoliikkeen historiaa. Historiasta ei voi päätellä, kuinka SPG:lle käy kasvihuonekaasujen lisääntyessä. Etenkin 1970-luvun kylmä anomalia oli poikkeuksellinen tilanne, johon vaikuttivat suurelta osin kertaluonteiset tekijät kuten ihmisen aikaansaamat rikkidioksidipäästöt. Lisäksi ennen AMO:on liittyvät pintalämpötilan vaihtelut ovat esiintyneet koko Pohjois-Atlantin laajuisesti. Jatkossa on todennäköisempää, että jossain päin Pohjois-Atlanttia sinnittelee ympäristöään hitaammin lämpenevä tai jopa jäähtyvä ”lämpöaukko”. Menneisyyttä ja havaintoja voi kuitenkin käyttää jo sen arvioimiseen, kuinka hyvin CMIP5 mallit pystyvät kuvaamaan SPG:hen liittyviä ilmiöitä. CMIP5-mallien vertailu 1970-luvun tilanteeseen antoi jo kuvaa mallien kyvystä kuvata SPG:hen liittyviä ilmiöitä. Ainoastaan viisi mallia kolmestatoista kuvasi tilanteen kohtuullisen hyvin. Kun lisäksi katsottiin mallien kykyä kuvata nykyistä syvänveden muodostusta ja merenpinnan tiheyttä SPG-alueella, saatiin tehtyä vertailuryhmä SPG-romahdus. Siinä on RCP2.6-skenaariolla vain kolme jäsentä. Kun huomioidaan kaikki 40 CMIP5-mallia, subpolaaripyörteen romahduksen todennäköisyys on 17.5%, eli romahdus tapahtuu Sgubinin ym. (2017) tutkimuksen mukaan seitsemässä mallissa neljästäkymmenestä. Jos alamme rajata huonoiten asiaa kuvaavia malleja pois, SPG-romahduksen todennäköisyyden saa nostettua jopa yli 50 prosentin. Tämä johtuu CMIP5-mallien huonosta kyvystä kuvata meren olosuhteita SPG alueella. SPG-romahduksen todennäköisyys lieenee todellisuudessa suurempi myös sen vuoksi, ettei Grönlannin sulamista ole mukana CMIP5-malleissa.

SPG:n romahduksen mahdollisuus lisää ilmaston kaoottisuutta eli heikentää ilmastonvaihteluiden ennustettavuutta. Samojen mallien eri skenaarioilla osassa romahdus tapahtuu, osassa ei. Myös yhdessä sattumanvaraisessa historiallisessa ajossa tapahtui romahdus. Vaikuttaa siltä, että SPG-romahdus on pienestä kiinni ja sen voi käynnistää sattumanvarainen ilmiö ilmakehän kiertoliikkeessä. Romahduksen todennäköisyys CMIP5-malleissa ei myöskään kasva suuremmilla päästöskenaarioilla. RCP2.6-skenaariolla romahdus esiintyi kolmessa mallissa ja yhdessä mallissa tapahtui monta romahdusta, joiden välillä SPG palautui ennalleen. Suurempien päästöjen RCP4.5- ja RCP8.5-skenaarioilla romahdus tapahtui vain kolmessa kummassakin.

Mahdollisuus siihen, että SPG muuttuu ”hulluksi”, eli tapahtuu lukuisia SPG:n äkillisiä jäähtymisiä ja niitä seuraavia lämpenemisiä tällä vuosisadalla, oli CMIP5-malleissa lähes yhtä todennäköinen, kuin yksi äkillinen romahdus. Itse pidän tätä vaihtoehtoa varsin varteenotettavana. Pohjois-Atlantilla on taipumus vuoristojen takia ylläpitää voimakasta AMOCia. Lisäksi mahdollinen SPG:n äkillinen kylmeneminen ja siihen liittyvä AMOCin heikkeneminen voivat pysäyttää merijään vähenemisen Arktisella alueella. Tämä voi aiheuttaa sen, ettei AMOCinkaan heikkeneminen tule olemaan jatkuvaa. Kylmempi alue koko Pohjois-Atlantin alueella on myös historiassa useasti liittynyt voimakkaaseen NAO:oon, joka voisi käynnistää syvänveden muodostuksen SPG:ssä uudestaan.

Mikä olisi SPG:n romahduksen keskimääräinen vaikutus Euroopan ilmastoon tällä vuosisadalla? SPG-romahdus pienentää ilmaston muutoksen aiheuttamaa arktisen alueen lämpenemistä ja ainakin hidastaa merijään sulamista alueella. Eurooppakin lämpenee hitaammin SPG-romahdus-malleissa kuin muissa, mutta 95% todennäköisyydellä merkitsevä jäähdyttävä vaikutus ulottuu lähinnä Länsi-Eurooppaan. Voimakkaimmin vaikutukset näkyvät talvella ja keväällä, heikoimmin kesällä ja syksyllä. Se on luonnollista, kun muutoksien liikkeelle paneva syy on talvisen syvänveden muodostumisen loppuminen SPG-alueella. Myös kesän heikompi lämpötilagradientti pohjoisen ja etelän välillä, eli pienempi barokliininen instabiliteetti vaikuttanee asiaan. Kesän sademäärät ja sää ovat sattumanvaraisempaa konvektiivista laatua kuin talven matalapainetoiminta. Ilmakehän virtaustyyppi on myös SPG-romahdusmalleissa todennäköisesti erilainen. Hyvällä tahdolla voi jopa uskoa, että blocking-tyyppinen korkeapainetoiminta Grönlandin ja Länsi-Euroopan välillä lisääntyy. Tästä näkyy merkkejä pintapaine kentässä ja esimerkiksi menneet kylmät tilanteet Pohjois-Atlantilla ovat osuneet yhteen Länsi-Euroopan helleaaltojen kanssa (Josey ym. 2018). Sademäärässäkin on laskua Pohjois-Atlantin myrskyradan alueella. Tuo sademäärien väheneminen on suurin SPG-alueen ulkopuolelta löytyvä sademäärän poikkeama, jos Pohjois-Afrikan epäluotettava tilanne jätetään huomiotta.

Se mikä jää eniten kiusaamaan, on nimenomaan suhteellisesti kylmenevän subpolaarisen alueen ja ilmakehän välinen yhteys. On tutkittu aika paljonkin koko Pohjois-Atlantin mittakaavan lämpenemisen ja kylmenemisen vaikutusta ilmastoon. Tutkitut vaihtelut kuvaavat kuitenkin mennyttä ilmastoa. Ennen AMO-vaihtelu ja lämpökonvergenssi kattoivat koko Pohjois-Atlantin. Ei enää. Jo parin vuosikymmenen ajan Pohjois-Atlantilla on esiintynyt vaihteleva ”lämpöaukko”. Mallinnukset ilmaston lämpenemisestä antavat olettaa, että ilmiö tulee voimistumaan. Pitäisi tutkia

miten lämpöaukko, joka esiintyy Itäisellä Pohjois-Atlantilla vaikuttaa ilmastoon Euroopassa ja toisaalta mikä on tässä tutkimuksessa käytetyn SPG:n kylmenemisen vaikutus.

Lähdeluettelo

ARGO, 2020. <http://www.argo.ucsd.edu/> Viitattu 25.5.2020

Belkin, I.M. ; Levitus, S. ; Antonov, J. ; Malmberg, S.-A. 1998:“Great Salinity Anomalies” in the North Atlantic. *Progress in Oceanography* 1/1998, Vol.41(1), pp.1-68

Bellucci, A. ; Mariotti, A. ; Gualdi, S. 2017: The Role of Forcings in the Twentieth-Century North Atlantic Multidecadal Variability The 1940–75 North Atlantic Cooling Case Study. *Journal of Climate* 2017, Vol.30(18), pp.7317-7337

Born, A.; T. F. Stocker; C. C. Raible and A. Levermann, 2013: Is the Atlantic subpolar gyre bistable in comprehensive coupled climate models? *Climate Dynamics*, Vol.40(11), pp.2993-3007

Bryden, H. L., Johns, W. E., King, B. A., McCarthy, G., McDonagh, E. L., Moat, B. I., & Smeed, D. A. 2020: Reduction in ocean heat transport at 26°N since 2008 cools the eastern subpolar gyre of the north atlantic ocean. *Journal of Climate*, 33(5), 1677-1689.

Delworth, Thomas ; Zeng, Fanrong 2016: The Impact of the North Atlantic Oscillation on Climate through Its Influence on the Atlantic Meridional Overturning Circulation. *Journal of Climate*, Vol.29(3), pp.941-962

Dukhovskoy, D. S., Yashayaev, I., Proshutinsky, A., Bamber, J. L., Bashmachnikov, I. L., Chassignet, E. P., et al. 2019: Role of Greenland freshwater anomaly in the recent freshening of the subpolar North Atlantic. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 124, 3333- 3360. <https://doi-org.libproxy.helsinki.fi/10.1029/2018JC014686>

Flato, G., J. Marotzke, B. Abiodun, P. Braconnot, S.C. Chou, W. Collins, P. Cox, F. Driouech, S. Emori, V. Eyring, C. Forest, P. Gleckler, E. Guilyardi, C. Jakob, V. Kattsov, C. Reason and M. Rummukainen, 2013: Evaluation of Climate Models. In: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

Garcia-Quintana, Y.; Courtois, P.; Hu, Xianmin ; Pennelly, Clark ; Kieke, Dagmar ; Myers, Paul G. 2019: Sensitivity of Labrador Sea Water Formation to Changes in Model Resolution,

- Atmospheric Forcing, and Freshwater Input. *Journal of Geophysical Research: Oceans* March 2019, Vol.124(3), pp.2126-2152
- Gastineau, G. ja Frankignoul, C. 2015: Influence of the North Atlantic SST Variability on the Atmospheric Circulation during the Twentieth Century. *Journal of Climate* , Vol.28(4), pp.1396-1416
- Hodson, D. L. R., Robson, J. I., & Sutton, R. T. 2014: An anatomy of the cooling of the north atlantic ocean in the 1960s and 1970s. *Journal of Climate*, 27(21), 8229-8243. <https://search-proquest-com.libproxy.helsinki.fi/docview/1617801045?accountid=11365>
- Häkkinen, S.; Rhines, P. B; Worthen, Denise L 2011: Atmospheric blocking and Atlantic multideadal ocean variability. *Science* (New York, N.Y.) 04 November 2011, Vol.334(6056), pp.655-9.
- IPCC, 2014: Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 151 pp.
- IPCC, 2019: IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, V. Masson-Delmotte, P. Zhai, M. Tignor, E. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Nicolai, A. Okem, J. Petzold, B. Rama, N.M. Weyer (eds.)] In press
- Jackson, L.; Smith, R.; Wood, R. 2017: Ocean and atmosphere feedbacks affecting AMOC hysteresis in a GCM. *Climate Dynamics* , Vol.49(1), pp.173-191
- Jones, C. S.; Abernathey, Ryan P. 2019: Isopycnal Mixing Controls Deep Ocean Ventilation. *Geophysical Research Letters* , Vol.46(22), pp.13144-13151
- Josey, S. A.; Hirschi, J. J.-M.; Sinha, B.; Duchez, A.; Grist, J. P.; Marsh, R., 2018: The Recent Atlantic Cold Anomaly: Causes, Consequences, and Related Phenomena. *Annual Review of Marine Science* Vol.10, p.475-50
- Karspeck, A. R. ; Stammer, D. ; Köhl, A. ; Danabasoglu, G. ; Balmaseda, M. ; Smith, D. M. ; Fujii, Y. ; Zhang, S. ; Giese, B. ; Tsujino, H. ; Rosati, A. 2017: Comparison of the Atlantic meridional overturning circulation between 1960 and 2007 in six ocean reanalysis products. *Climate Dynamics* , Vol.49(3), pp.957-982
- Koenig, T., U. Mikolajewicz, H. Haak, and J. Jungclaus 2007: Arctic freshwater export in the 20th and 21st centuries, *J. Geophys. Res.*, 112, G04S41, doi:10.1029/2006JG000274.
- Levermann, A., and Born, A. 2007: Bistability of the Atlantic subpolar gyre in a coarse-resolution climate model, *Geophys. Res. Lett.*, 34, L24605, doi:10.1029/2007GL031732.

- Li, H.; Ilyina, T.; Müller, W. A.; Sienz, F. 2016: Decadal predictions of the North Atlantic CO₂ uptake. *Nature communications*, Vol.7, pp.11076
- Lohmann, K., Drange, H., and Bentsen, M. (2009), A possible mechanism for the strong weakening of the North Atlantic subpolar gyre in the mid-1990s, *Geophys. Res. Lett.*, 36, L15602, doi:10.1029/2009GL039166.
- Lozier, M. S.; Bacon, S.; Bower, A.S.; Cunningham, Stuart A.; De Jong, M. Femke; De Steur, Laura; Deyoung, Brad; Fischer, Jürgen; Gary, Stefan F.; Greenan, Blair J. W.; Heimbach, P.; Holliday, Naomi P.; Houpert, L.; Inall, M. E.; Johns, W. E.; Johnson, H. L.; Karstensen, J.; Li, 2017: OVERTURNING IN THE SUBPOLAR NORTH ATLANTIC PROGRAM A New International Ocean Observing System *Bulletin of the American Meteorological Society*, Vol.98(4), pp.737-752
- Lozier, M. S.; Li, F.; Bacon, S.; Bahr, F.; Bower, A S.; Cunningham, S A.; De Jong, M F.; De Steur, L.; Deyoung, B.; Fischer, J.; Gary, S F.; Greenan, B J W.; Holliday, N P.; Houk, A.; Houpert, L.; Inall, M E.; Johns, W E.; Johnson, H L.; Johnson, C.; Karstensen, 2019: A sea change in our view of overturning in the subpolar North Atlantic. *Science (New York, N.Y.)* 01 February 2019, Vol.363(6426), pp.516-521
- Menary, M. B., Hodson, D. L. R., Robson, J. I., Sutton, R. T., & Wood, R. A. 2015: A mechanism of internal decadal atlantic ocean variability in a high-resolution coupled climate model. *Journal of Climate*, 28(19), 7764-7785.
- Menary, M. B. and R. A. Wood, 2018: An anatomy of the projected North Atlantic warming hole in CMIP5 models. *Climate Dynamics*, 50 (7-8), 3063-3080, doi:10.1007/s00382-017-3793-8.
- Nummelin, Aleks; Li, Camille; Hezel, Paul J. 2017: Connecting ocean heat transport changes from the midlatitudes to the Arctic Ocean. *Geophysical Research Letters* 28, Vol.44(4), pp.1899-1908
- Oldenburg, D.; Armour, K. C.; Thompson, L.; Bitz, C. M. 2018: Distinct Mechanisms of Ocean Heat Transport Into the Arctic Under Internal Variability and Climate Change. *Geophysical Research Letters* 16, Vol.45(15), pp.7692-7700
- OSNAP (Overturning in the Subpolar North Atlantic Program), 2020. <https://www.o-snap.org/>. Viitattu 25.5.2020
- Robson, J., Ortega, P. & Sutton, R. 2016: A reversal of climatic trends in the North Atlantic since 2005. *Nature Geosci* 9, 513–517 <https://doi-org.libproxy.helsinki.fi/10.1038/ngeo2727>
- Ruiz-Barradas, A.; Chafik, L.; Nigam, S. 2018: Recent subsurface North Atlantic cooling trend in context of Atlantic decadal-to-multidecadal variability. *Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography* 01 January 2018, Vol.70(1), pp.1-19

- Seager, R., D. S. Battisti, J. Yin, N. Gordon, N. Naik, A. C. Clement & M. A. Cane, 2002: Is the Gulf Stream responsible for Europe's mild winters? *Q. J. R. Meteorol. Soc.* 128, 2563-2586.
- Sévellec, F., Fedorov, A. & Liu, W. 2017: Arctic sea-ice decline weakens the Atlantic Meridional Overturning Circulation. *Nature Clim Change* 7, 604–610
- Sgubin, G., Swingedouw, D., Drijfhout, S., Mary, Y., & Bennabi, A. (2017). Abrupt cooling over the north atlantic in modern climate models. *Nature Communications*, 8, 12. doi:<http://dx.doi.org.libproxy.helsinki.fi/10.1038/ncomms14375>
- Sinha, B., Blaker, A. T., Hirschi, J. J.-M., Bonham, S., Brand, M., Josey, S., Smith, R. S., and Marotzke, J. (2012), Mountain ranges favour vigorous Atlantic meridional overturning, *Geophys. Res. Lett.*, 39, L02705, doi:10.1029/2011GL050485.
- Smeed D. A., S. A. Josey, C. Beaulieu, W. E. Johns, B. I. Moat, E. Frajka-Williams, D. Rayner, C. S. Meinen, M. O. Baringer, H.L.Bryden, G.D.McCarthy 2018: The North Atlantic Ocean Is in a State of Reduced Overturning. *Geophysical Research Letters*, Vol.45(3), pp.1527-1533 <https://doi.org/10.1002/2017GL076350>
- Sutton, R. T. ; Hodson, D. L. R. 2007: Climate Response to Basin-Scale Warming and Cooling of the North Atlantic Ocean. *Journal of Climate*, Vol.20(5), pp.891-907
- Sutton, R. T., McCarthy, G. D., Robson, J., Sinha, B., Archibald, A. T., & Gray, L. J. (2018). Atlantic multidecadal variability and the U.K. ACSIS program. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 99(2), 415-425.
- Vuuren, D.; Edmonds, J.; Kainuma, M.; Riahi, K.; Thomson, A.; Hibbard, K.; Hurtt, G.; Kram, T.; Krey, V.; Lamarque, J-F.; Masui, T.; Meinshausen, M.; Nakicenovic, N.; Smith, S.; Rose, S. 2011: The representative concentration pathways: an overview. *Climatic Change*, Vol.109(1), pp.5-31
- Wadhams, P. ; Holford, J. ; Hansen, E. ; Wilkinson, J. P. 2002: A deep convective chimney in the winter greenland sea. *Geophysical Research Letters*, Vol.29(10), pp.76-1-76-4
- Zou, S.; Lozier, M. 2016: Breaking the Linkage Between Labrador Sea Water Production and Its Advective Export to the Subtropical Gyre. *Journal of Physical Oceanography* Vol.46(7), pp.2169-2182
- Zou, S., Lozier, M. S.; Buckley, M. 2019: How Is Meridional Coherence Maintained in the Lower Limb of the Atlantic Meridional Overturning Circulation? *Geophysical Research Letters*, Vol.46(1), pp.244-252